

В.Е. Хаин, Э.Н. Халилов

**ЦИКЛИЧНОСТЬ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ:
ее возможная природа**



НАУЧНЫЙ МИР

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. МБ. ЛОМОНОСОВА

MOSCOW STATE UNIVERSITY

V.E. KHAIN, E.N. KHALILOV

**CYCLES IN GEODYNAMIC
PROCESSES:
THEIR POSSIBLE NATURE**

Moscow
Scientific World
2009

В.Е. ХАИН, Э.Н. ХАЛИЛОВ

**ЦИКЛИЧНОСТЬ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ:
ЕЕ ВОЗМОЖНАЯ ПРИРОДА**

Москва
Научный мир
2009

УДК 551
ББК 26.324
X 12

Хаин В.Е., Халилов Э.Н.

ЦИКЛИЧНОСТЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ: ЕЕ ВОЗМОЖНАЯ ПРИРОДА. - М.: Научный мир, 2009. - 520 с.

ISBN 978-5-91522-082-8

В книге рассмотрен широкий круг вопросов, посвященных как современным представлениям, так и результатам исследования авторами цикличности геодинамических процессов и их различных проявлений.

Показана возможность влияния сверхдлинных гравитационных волн космического происхождения на геодинамические процессы.

Описан положительный опыт краткосрочного прогнозирования сильных удаленных землетрясений на основании длиннопериодных гравитационных предвестников.

Сделана попытка показать целостность и единство природы взаимодействия процессов в различных слоях геосферы в тесной связи с космическими факторами.

Книга предназначена для ученых, специалистов и студентов в областях наук о Земле.

Khain V.E., Khalilov E.N.

CYCLES IN GEODYNAMIC PROCESSES: THEIR POSSIBLE NATURE. - Moscow: Scientific World, 2009. - 520 p.

The book covers a wide range of problems and is devoted both to modern concepts and to the results of research carried out by the authors on cycles in geodynamic processes and their different manifestations.

The possible influence of super-long gravitational waves of cosmic origin on geodynamic processes was shown.

Positive experience in short-term forecast of distant earthquakes on the basis of long-period gravitational precursors is described.

The authors sought to show the natural integrity of interrelating processes in the various geospheres in close connection with cosmic factors.

The book is intended for scientists, specialists and students engaged in Earth sciences.

ISBN 978-5-91522-082-8

© В.Е. Хаин, Э.Н. Халилов, 2009
О Научный мир, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	15
INTRODUCTION.....	20
<i>Глава 1. ИСТОРИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ</i> РОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ.....	25
1.1. РОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ.....	25
1.2. ОРАЗОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ.....	37
1.3. СЕРЫЕ ГНЕЙСЫ И ЗАРОЖДЕНИЕ КОНТИНЕНТОВ.....	41
1.4. ТЕКТОНИКА ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ.....	48
1.5. ПРОЯВЛЕНИЯ ЦИКЛИЧНОСТИ В ВЕЛИКИХ ОЛЕДЕНЕНИЯХ.....	56
1.6. НЕПРЕРЫВНОСТЬ ИЛИ ПРЕРЫВИСТОСТЬ В РАЗВИТИИ ПРИРОДЫ.....	71
1.7. НАПРАВЛЕННОСТЬ И ЦИКЛИЧНОСТЬ В ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ.....	84
1.8. СОВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА КОРЫ И ЛИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ.....	99
<i>Глава 2. ЦИКЛИЧНОСТЬ В ПРОЯВЛЕНИЯХ СОВРЕМЕННЫХ</i> ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	104
2.1. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЦИКЛИЧНОСТИ.....	104
2.1.1. Некоторые особенности в проявлениях цикличности геодинамических процессов.....	104
2.1.2. Проявления цикличности в инверсиях магнитных полюсов.....	108
2.1.3. Космогеологические аспекты цикличности.....	113
2.2. ВУЛКАНИЗМ И СЕЙСМИЧНОСТЬ.....	124
2.2.1. Пространственное распределение вулканизма и сейсмичности.....	124
2.2.2. Магматические вулканы.....	132
2.2.3. Грязевые вулканы.....	134

2.3. ЦИКЛИЧНОСТЬ В ПРОЯВЛЕНИЯХ ВУЛКАНИЗМА И СЕЙСМИЧНОСТИ.....	141
2.3.1. Современная вулканическая активность.....	141
2.3.2. Современная сейсмическая активность.....	142
2.4. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВУЛКАНИЗМА И СЕЙСМИЧНОСТИ.....	143
2.4.1. Методологические основы математической обработки и анализа временных рядов.....	143
2.4.2. Методологические особенности установления корреляционной связи между различными периодическими процессами.....	150
2.4.3. Принципиальные особенности физических различий волновых и циклических процессов.....	153
2.4.4. Пространственно-временные закономерности современной вулканической активности.....	155
2.4.5. Пространственно-временные закономерности современной сейсмической активности.....	176
2.5. ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ ВУЛКАНИЗМА И СЕЙСМИЧНОСТИ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ДРУГИМИ КОСМИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ.....	187
2.5.1. Возможная связь современных проявлений вулканизма и сейсмичности с космическими факторами.....	187
2.5.2. Солнечная активность.....	193
2.5.3. Вулканизм и солнечная активность.....	197
2.5.4. Сейсмичность и солнечная активность.....	203
2.6. ДОЛГОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ.....	211

Глава 3. СВЯЗЬ НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ГЛУБИННЫМИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.....	215
3.1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ.....	215
3.2. НЕПРИЛИВНЫЕ ВАРИАЦИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.....	217
3.2.1. Землетрясения на Тайване М7 (15.10.2004).....	219
3.2.2. Катастрофическое землетрясение в Индонезии М9 (26.12.2004).....	219
3.2.3. Серия землетрясений в Индонезии и Японии М5,5-6,2 (с 19 по 30.08.2005).....	223
3.2.4. Катастрофическое землетрясение в Пакистане М7,7 (08.10.2005).....	224

3.2.5. Катастрофическое землетрясение в Индонезии М7,7 (27.01.2006).....	226
3.2.6. Землетрясение в Индонезии М6,1 и Индии М6,3 (09.01.2005 г. и 24.01.2005).....	227
3.2.7. Землетрясение на Филиппинах М7,1 (05.02.2005).....	228
3.2.8. Землетрясение в Южном Иране М6 (13.03.2005) и Индонезии М8,7 (28.03.2005).....	229
3.2.9. Землетрясения в Индонезии М6,3 (27.05.2006) и М7,7 (17.06.2006).....	230
3.2.10. Землетрясения в Японии М6 (10.10.2006) и на Курилах М8,3 (15.11.2006).....	232
3.3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.....	232
3.4. ЯДРО ЗЕМЛИ - ОСНОВНОЙ ГЕНЕРАТОР СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ.....	235

Глава 4. О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЦИКЛИЧНОСТЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	252
4.1. ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ И ВОЗМОЖНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ЕЕ ВАРИАЦИЙ.....	252
4.2. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ.....	260
4.3. ВОЗМОЖНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ВАРИАЦИЯХ ИЗМЕРЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ.....	285
4.4. О РЕАКЦИИ ВЕСОВ КАВЕНДИША В ПОЛЕ ПРОХОДЯЩЕЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНЫ.....	287
4.5. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И ИХ ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА.....	293
4.6. ВОЗМОЖНОСТЬ ВЛИЯНИЯ СВЕРХДЛИННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН (СГВ) НА ГЕОДИНАМИ- ЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	306
4.6.1. Гравитационные волны и квадрупольная деформация Земли.....	306
4.6.2. Космическая геодезическая программа NASA. Лазерная дальнометрия со спутника.....	306
4.6.3. Особенности квадрупольной деформации Земли по данным космической лазерной дальнометрии.....	309

4.6.4. Земля - универсальный детектор гравитационных волн.....	315
4.6.5. Влияние сверхдлинных гравитационных волн на вариации длительности земных суток.....	323
4.7. ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЗЕМЛИ.....	334
4.8. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И ЦИКЛИЧНОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ.....	344
4.9. ОТРАЖЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ОСЕЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ.....	349
4.10. ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ СГВ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ДЕФОРМАЦИЮ ЗЕМЛИ.....	352
Глава 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ИЗМЕРЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ.....	355
5.1. ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ.....	355
5.2. ТОРСИОННЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВАРИАЦИЙ (ТДДГВ).....	356
5.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТОРСИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ «АТРОРАТЕНА» ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВАРИАЦИЙ И ИХ ВОЗМОЖНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ.....	359
5.4. ОТРАЖЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ВОЛН В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЯХ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.....	370
5.5. ЧТО РЕГИСТРИРУЕТ АТРОРАТЕНА?.....	379
5.6. ПРОГРАММА МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ - ICER.....	387
Глава 6. ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ЦИКЛИЧНОСТЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	395
6.1. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В СФЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОНИТОРИНГА ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА.....	395
6.2. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА.....	399

9 Оглавление

6.3. ВУЛКАНИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА.....	401
6.4. ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ.....	403
6.5. ВЫВОДЫ.....	406
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	408
CONCLUSION.....	435
ЛИТЕРАТУРА.....	457
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	499
Основные геолого-геофизические и астрономические данные о Земле.....	500
Основные используемые термины.....	507
Некоторые астрономические величины.....	517
Основные физические константы.....	518

CONTENTS

INTRODUCTION.....	15
<i>Chapter 1. EARTH'S ORIGIN AND EVOLUTION.....</i>	25
1.1. ORIGIN OF THE PLANET EARTH.....	25
1.2. FORMATION OF THE EARTH'S CRUST.....	37
1.3. GRAY GNEISS AND ORIGIN OF CONTINENTS.....	41
1.4. TECTONICS OF LITHOSPHERIC PLATES.....	48
1.5. CYCLES IN GLOBAL GLACIATIONS.....	56
1.6. CONTINUOUS OR INTERMITTENT NATURAL DEVELOPMENT.....	71
1.7. TRENDS AND CYCLES IN THE EARTH EVOLUTION.	84
1.8. RECENT STRUCTURE OF EARTH'S CRUST AND LITHOSPHERE.....	99
<i>Chapter 2. CYCLES IN RECENT GEODYNAMIC PROCESSES.....</i>	104
2.1. SOME PROBLEMS OF CYCLES.....	104
2.1.1. Certain specific features of cycles in geodynamic processes.....	104
2.1.2. Cycles in the inversions of magnetic poles.....	108
2.1.3. Cosmogeological aspects of cyclicity.....	113
2.2. VOLCANISM AND SEISMICITY.....	124
2.2.1. Volcanism and seismicity spatial distribution.....	124
2.2.2. Magmatic volcanoes.....	132
2.2.3. Mud volcanoes.....	134
2.3. CYCLES IN VOLCANISM AND SEISMICITY.....	141
2.3.1. Recent volcanic activity.....	141
2.3.2. Recent seismic activity.....	142
2.4. SPACE-TIME REGULARITY IN RECENT VOLCANISM AND SEISMICITY.....	143
2.4.1. Methodological basis for mathematical treatment and analysis of time series.....	143

2.4.2. Methodological aspects establishing correlative relation between various periodic processes.....	150
2.4.3. Basic aspects of physical differences between wave cycle processes.....	153
2.4.4. Space-time characteristics of recent volcanic activity.	155
2.4.5. Space—time characteristics of recent seismic activity.	176
2.5. POSSIBLE RELATIONSHIP BETWEEN VOLCANISM AND SEISMICITY AND THE SOLAR ACTIVITY AND OTHER COSMIC FACTORS.....	187
2.5.1. Possible relationship volcanism and seismicity with cosmic factors.....	187
2.5.2. Solar activity.....	193
2.5.3. Volcanism and solar activity.....	197
2.5.4. Seismicity and solar activity.....	203
2.6. LONG-TERM FORECASTS.....	211

Chapter 3. RELATIONS OF NON-TIDE GRAVITY VARIATIONS AND DEEP GEODYNAMIC PROCESSES.....215

3.1. STATE OF THE ART OF THE PROBLEM.....	215
3.2. NON-TIDE GRAVITY VARIATIONS AND SHORT-TERM FORECASTING OF EARTHQUAKES.....	217
3.2.1. Earthquake in Taiwan M7 (15.10.2004).....	219
3.2.2. Catastrophic earthquake in Indonesia M9 (26.12.2004)	219
3.2.3. A series of earthquakes in Indonesia and Japan M5.5-6.2 (from 19 to 30.08.2005).....	223
3.2.4. Catastrophic earthquake in Pakistan M7.7 (27.01.2006).....	224
3.2.5. Catastrophic earthquake in Indonesia M7.7 (27.01.2006).....	226
3.2.6. Earthquakes in Indonesia and India M6.3 (09.01.2005 and 24.01.2005).....	227
3.2.7. Earthquake in Philippines M7.1 (05.02.2005).....	228
3.2.8. Earthquakes in southern Iran M6 (13.03.2005) and in Indonesia M8.7 (28.03.2005)	
3.2.9. Earthquakes in Indonesia M6.3 (27.05.2006) and M7.7 (17.06.2006)	
3.2.10. Earthquakes in Japan M6 (10.10.2006) and in the Kurils M8.3 (15.11.2006)	232
3.3. LONG-RANGE EARTHQUAKE PREDICTS.	232
3.4. EARTH NUCLEUS IS THE MAIN GENF' SEISMIC ACTIVITY.	235

<i>Chapter 4.</i>	POSSIBLE EFFECTS OF GRAVITATIONAL COSMIC FACTORS ON CYCLES IN GEODYNAMIC PROCESSES.	252
4.1.	GRAVITATIONAL CONSTANT AND POSSIBLE COSMIC CAUSES OF ITS VARIATIONS.	252
4.2.	METROLOGICAL ASPECTS OF THE GRAVITATIONAL CONSTANT MEASUREMENT.	260
4.3.	POSSIBLE REFLECTION OF GRAVITATIONAL WAVES IN VARIATIONS OF THE MEASURED VALUES OF THE GRAVITATIONAL CONSTANT.	285
4.4.	BEHAVIOR OF THE CAVENDISH BALANCE IN THE FIELD OF A PASSING GRAVITATIONAL WAVE.	287
4.5.	GRAVITATIONAL WAVES AND THEIR PHYSICAL NATURE.	293
4.6.	POSSIBLE EFFECTS OF SUPERLONG GRAVITATIONAL WAVES ON GEODYNAMIC PROCESSES.	306
4.6.1.	Gravitationnal waves and quadropole deformation of the Earth.	306
4.6.2.	NASA cosmic geodesic program laser satellite images	306
4.6.3.	Quadropole Earth's deformation as indicated by data of cosmic laser remote sensing.	309
4.6.4.	Earth a universal detector of gravitational waves.	315
4.6.5.	Influence of superlong waves on variation in day-and-night duration on Earth.	323
4.7.	IMPACT OF THE GRAVITATIONAL FIELD OF PLANETS OF THE SOLAR SYSTEM ON NATURAL PROCESSES ON EARTH.	334
4.8.	GRAVITATIONAL WAVES AND VOLCANIC ACTIVITY CYCLES.	344
4.9.	REFLECTION OF GRAVITATIONAL WAVES IN SPACE-TIME CHANGES IN THE INTEGRAL STRAIN AXES OF THE EARTH'S CRUST.	349
4.10.	POSSIBLE MECHANISM OF INFLUENCE OF SGW ON GEODYNAMIC PROCESSES AND EARTH'S EFORMATION.	352
<i>Chapter 5.</i>	EXPERIMENTAL RESEARCH OF VARIATIONS OF THE MEASUREDENT VALUES OF THE GRAVITATIONAL CONSTANT.	355
5.1.	ESSESSMENT OF THE PROBLEM.	355

5.2. TORSION DETECTOR OF LONG PERIOD GRAVITATIONAL VARIATIONS (TD IGW).....	356
5.3. RESULTS OF MEASUREMENT WITH TORSION DETECTOR OF LONG-PERIOD GRAVITATIONAL ATROPATENA VARIATIONS AND THEIR INTERPRETATION.....	359
5.4. REFLECTION OF TECTONIC WAVES IN SPACE-TIME VARIATIONS OF THE EARTH'S GRAVITATIONAL FIELD.....	370
5.5. WHAT IS REGISTERED BY ATROPATENA?.....	379
5.6. PROGRAM OF INTERNATIONAL COOPERATION FOR EARTHQUAKE PREDICTION, ICEP.....	387
 <i>Chapter 6. GLOBAL CLIMATE CHANGE AND CYCLES</i> IN GEODYNAMIC PROCESSES.....	395
 CONCLUSION.....	435
 REFERENCES.....	457
 APPENDIX.....	499
Basic geologo-geophysical and astronomical date about Earth. . . .	500
Main terminology used.....	507
Some astronomical values.....	517
Main physical contants.....	518

«Априори (идя от причины к следствию) следовало бы ожидать, что в мире царят закон и порядок только в той степени, в какой мы (люди) вторгаемся в него с нашим рациональным мышлением... Но вместо этого мы находим в объективном мире такой высокий порядок, который априори не было никаких оснований ожидать. Это есть чудо, которое кажется все более и более необыкновенным по мере углубления нашего знания»
Альберт Эйнштейн

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей книге рассмотрено множество различных аспектов проявлений геодинамики Земли, объединенных основополагающей закономерностью протекания подавляющего большинства природных процессов, именуемой ЦИКЛИЧНОСТЬЮ.

Полемика между выдающимися древнегреческими философами Аристотелем и Демокритом о справедливости одной из двух философских концепций - «фидуализма» либо «пунктуализма», актуальна и в настоящее время, как указано в работе известного геолога Дж. Шенгёра (Şengör, 1991). Спор о правомерности одного из двух принципиально различных философских течений, первое из которых основано на признании непрерывности и постепенности, а второе - цикличности развития природы, по всей видимости, приближается к своему логическому завершению и примирению дискутирующих сторон, что также следует и из результатов данного научного труда.

Развитие человеческих познаний, в связи с увеличением объема информации в различных сферах естествознания, пошло по пути дифференциации знаний по разным научным направлениям, что позволило существенно углубить человеческие познания в разных сферах. Между тем, подобное развитие мысли имеет и свои отрицательные стороны, так как, произошло искусственное разделение неразрывно связанных между собой областей познания, причем с усилением технократического развития человечества увеличивается и разрыв в изучении различных научных дисциплин. Это привело, в свою очередь, к некой однобокости и обособленности изучения тех или иных природных процессов. К примеру, развитие астрономии и астрофизики практически никак не связано с развитием геологии и геофизики, хотя Земля является одним из элементов космического пространства и развивается в строгом соответствии и в тесной связи с развитием Вселенной и входящих в нее элементов - галактик, звездных систем и других образований.

В данном научном труде авторами сделана попытка рассмотреть в едином контексте различные процессы, происходящие в твердой Земле, гидросфере, атмосфере и магнитосфере в преломлении через восприятие Земли как элемента космоса, со всеми вытекающими из этого последствиями.

Авторы постарались проследить причинно-следственную связь между различными процессами на Земле и в космосе.

Используя системный подход при выявлении скрытых периодичностей на основе применения математического аппарата, включающего как спектральный анализ, так и линейное преобразование временных рядов, авторы установили цикличности в сейсмической и вулканической активностях в зависимости от их принадлежности к различным геодинамическим областям - поясам сжатия и растяжения Земли и внутриплитным зонам. Впервые было установлено, что 22-летние циклы сейсмической и вулканической активизации поясов сжатия и растяжения Земли находятся в противофазе, что, в свою очередь, свидетельствует о неодновременности процессов сжатия и растяжения Земли, приводящей к периодическим изменениям ее радиуса в пределах нескольких сантиметров (Ш.Ф. Мехтиев, В.Е. Хаин, Т.А. Исмаил-Заде, Э.Н. Халилов, 1986).

Изучение солнечно-земных взаимодействий уходит глубокими корнями к истокам зарождения философских знаний человечества, отводящих ведущую роль в земных событиях Солнцу. Между тем, приоритет научного осмысления этих связей с точки зрения современного естествознания заслуженно принадлежит А.И. Чижевскому, показавшему ведущую роль солнечной активности, в частности, ее 11-летних циклов (чисел Вольфа) в проявлениях различных процессов, биологического, социального, физико-химического и геологического характеров.

Авторами на основе различных корреляционных методов исследований показана возможность влияния солнечной активности на геодинамические процессы, в частности, на вулканическую и сейсмическую активность. Примечательно, что, если в периоды повышенной солнечной активности усиливается активность вулканов и землетрясений поясов сжатия литосферы (в зонах субдукции и коллизии литосферных плит), то в областях растяжения Земли (в рифтовых зонах) сейсмическая и вулканическая активность понижается до минимума. Этот факт свидетельствует о неоднозначности влияния солнечной активности на геодинамические процессы и также подтверждает возможность периодического изменения радиуса Земли. Сделана попытка долгосрочного прогнозирования вулканической и сейсмической активности поясов сжатия Земли до 2020 года.

В работе рассмотрена проблема дрейфа геомагнитных полюсов Земли, приведены результаты исследований в этой области различных научных центров и варианты дальнейшего развития событий.

Книга высветила совершенно новые аспекты гравитационно-волновых исследований, прежде всего, в преломлении через призму наук о Земле, в частности, геодинамики.

Авторы попытались показать, что, казавшаяся чисто астрофизической, проблема гравитационных волн на самом деле также входит в круг интересов геофизики и геологии и, прежде всего - геодинамики.

Как влияют на геодинамические процессы проходящие через Землю гравитационные волны, обладающие различной амплитудой и длиной, каким образом они отражаются на деформациях формы Земли, движении литосферных плит, проявлении внутренней энергетики планеты, отражающейся в изменении сейсмической и вулканической активности и т.д.? Сделана попытка частично ответить на эти и другие вопросы, не рассматривавшиеся ранее науками о Земле самостоятельно и столь детально.

С помощью технических средств пока что астрофизикам не удалось зафиксировать гравитационные волны. Но Земля сама является сложной энергофункциональной системой, чутко реагирующей на любые внешние воздействия. Авторы монографии попытались использовать в качестве детектора гравитационных волн саму Землю, точнее, реакцию геодинамических процессов на прохождение сверхдлинных гравитационных волн. В книге показана возможность влияния СГВ на квадрупольную деформацию Земли посредством пространственно-временного распределения энергетических и геодинамических процессов. Результаты исследований приводят к предположению, что механизм влияния СГВ на квадрупольную деформацию Земли существенно сложнее, чем простое изменение метрики пространства под действием гравитационной волны.

Установление цикличности в гравитационном поле Земли при геофизических исследованиях неприливных вариаций силы тяжести привело к интересным выводам. Так, с помощью станции «Бинагади» (Апшеронский полуостров), осуществляющей мониторинг силы тяжести на протяжении последних нескольких лет, были установлены существенные неприливно-аномалии силы тяжести (0,5-1,5 мГал), возникающие за 1-3 недели до сильных удаленных землетрясений. Необычность данного факта заключена, прежде всего, в расстояниях, отделяющих регистрирующую станцию от очагов будущих землетрясений, превышающих в отдельных случаях 10 тысяч километров. Показана статистическая достоверность полученных результатов, подтверждаемых непрерывными наблюдениями на станции «Бинагади» с января 2004 по июнь 2008 года (в настоящее время наблюдения продолжаются). Так, регистрация гравитационного предвестника в 90% случаев наблюдается перед сильными удаленными землетрясениями с магнитудой $>6,5$.

В книге сделана попытка логического объяснения этого факта, в частности прохождением под станцией «Бинагади» тектонических волн, предшествующих удаленным сильным землетрясениям. Рассмотрены возможные источники тектонических волн.

Показано влияние гравитационного поля планет Солнечной системы на сейсмические и вулканические проявления, приведены некоторые расчеты и предложен возможный механизм этих влияний.

В книге уделено внимание и такой насущной проблеме, как глобальные климатические изменения на нашей планете. Проведенные авторами сравнения графиков изменений средних температур Земли и извержений магматических вулканов поясов сжатия Земли показало их высокую корреляцию. На основе анализа этих графиков и некоторых других параметров авторы выдвигают предположение, что все-таки, основной причиной глобальных климатических изменений является не техногенный, а природный фактор. Как известно, при извержениях вулканов в атмосферу выделяется огромное количество эндогенных газов, прежде всего CO_2 и CH_4 , которые ответственны, по мнению многих экспертов, за возникновение парникового эффекта и, как следствие, повышение среднегодовых температур на Земле. Высокий уровень корреляции между вулканической активностью и среднегодовыми температурами свидетельствует в пользу преобладающего влияния эндогенного фактора на глобальные климатические изменения.

Пожалуй, наиболее нестандартными в данном труде можно назвать результаты исследований, основанных на применении совершенно нового геофизического инструмента - торсионного детектора длиннопериодных гравитационных вариаций (ТД ДГВ) и основанной на его использовании станции прогнозирования землетрясений АТРОПАТЕНА.

Физический принцип АТРОПАТЕНА основан на непрерывной регистрации гравитационной постоянной в двух взаимно перпендикулярных направлениях с одновременной регистрацией ускорения силы тяжести. Причем все три датчика (весы Кавендиша, ориентированные в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и высокоточный гравиметр - сенсоры X, Y, Z) помещены в едином стеклянном корпусе, в котором поддерживается глубокий вакуум. Съем информации осуществляется с помощью сложных лазерных систем и оптических матриц. Так вот, этот прибор показал, что вариации значений гравитационной постоянной, измеренных в двух взаимно перпендикулярных направлениях, зачастую никак не коррелируют между собой, а порой попадают в противофазу.

Этот факт является прямым подтверждением того, что измеренные вариации гравитационной постоянной ни в коей мере не отражают каких-либо временных изменений самой константы, а связаны с влиянием внешних гравитационных полей на весы Кавендиша.

Было установлено, что вариации измеренных значений гравитационной постоянной регистрируются за 1-3 недели перед сильными удаленными землетрясениями и отражают, по всей видимости, прохождение под станцией АТРОПАТЕНА тектонических волн, предшествующих сильным землетрясениям. Причем, соотношение проявления гравитационных аномалий, записанных сенсорами X,Y,Z напрямую зависит от ориентации АТРОПАТЕНА по отношению к очагу будущего землетрясения.

Таким образом, по мнению авторов, можно подвести черту под спором, длящимся более полувека, о природе регистрируемых многими учеными Мира вариаций в измеренных значениях гравитационной постоянной. Ответ, по мнению ав-

«ров настоящего исследования, найден - влияние на весы Кавендиша внешних **гравитационных** полей геодинамической природы.

Логическим продолжением результатов данных исследований является **со-ххание** в 2008 году Глобальной Международной Сети станций прогнозирования землетрясений - ATROPATENA, принцип деятельности и структура которой **детально** описаны в книге.

Таким образом, в книге сделана попытка рассмотреть нашу планету как **эле-мент** единой многофункциональной космической системы, показать целостность • единство природы взаимодействия процессов в различных слоях геосферы: тектоносфере, гидросфере, атмосфере и магнитосфере, в тесной связи с **космическими** факторами.

«A priori (moving in the direction from cause to effect) we ought to expect that the world is governed by law and order only to the extent to which we (people) intrude into it by our rational mind... But instead, we find in the objective world such a high order, which there were no grounds to expect a priori. This is a miracle, which appears still more surprising, as our knowledge increases»

Albert Einstein

INTRODUCTION

The book covers a wide range of aspects of the Earth geodynamics united by a fundamental principle, indicating that the majority of natural processes consist of cycles.

The debates between the Greek philosophers Aristotle and Democritus, on the validity of one of the two philosophical concepts - gradualism or punctualism, is still vital nowadays, as reported in the work by the prominent geologist C. Sengor (1991). The debate about the authority of one of the two quite different philosophical trends, the first of which is based on recognition of continuous and progressive development, and the second, on the cycle-arranged evolution, is most likely approaching its logical end conciliating controversial concepts; this conclusion can also be inferred from the results of this work.

With increasing volume of information in different spheres of the natural sciences, the development of knowledge followed the way of science differentiation in diverse directions. That favored a substantial growth of our knowledge in various spheres. However, such development of thought had its negative side, bringing about artificial separation of closely connected fields of knowledge, and the advancing technological development of the mankind increased the break between various scientific disciplines. Consequently, studies of natural sciences got separated and became one-sided. For instance, the development of astronomy and astrophysics were not at all linked with development of geology and geophysics, though Earth is one of the elements of cosmic space and evolves in strict agreement and close relation with the evolution of the Universe and its elements: galaxies, celestial systems, and other bodies.

In this paper the authors made an attempt to review within the same context different processes, going on in the solid Earth, hydrosphere, atmosphere, and magnetosphere, regarding Earth as a cosmic element, with all naturally following consequences.

The authors tried to trace the cause-effect relations between various processes on Earth and in Cosmos.

To reveal concealed periodicities, they applied a systematic approach using a mathematical method, which includes both spectroscopy and linear transformation of temporal rows. As a result they have discovered cycles in the seismic and volcanic activity

depending upon their assignment to different dynamic fields - compression and extension belts of Earth and intraplate zones. It was established that 22-year cycles of the **seismic** and volcanic activation, occurring in compression and extension belts of Earth, **are found** in phase opposition, which, in its turn, suggests that processes of compression and extension of Earth were not synchronous, causing sporadic changes in its **radius** within several centimeters.

Studies of solar-earth interactions date back to the time of the origin of philosophic **•Things**, which highlighted the role of the Sun in terrestrial events. However, the priority in scientific comprehension and interpretation of these relations from the point of view of natural science belong to A.L. Chizhevsky, who demonstrated the leading role **of** the solar activity, in particular, its 11-year cycles (Wolf numbers), in various processes of biological, social, physical-chemical, and geological character.

This monograph, on the basis of different correlation methods, shows the possible influence of the solar activity on geodynamic processes, in particular, on the volcanic **and** seismic activity. It is notable that in the periods of increased solar activity, the **activity** of volcanoes and earthquakes in Earth compression belts (in zones of subduction **and** collision of lithospheric plates) grows, whereas in Earth extension areas (in rift **zones**) the seismic and volcanic activity declines to the minimum. This phenomenon **makes** evident variable influence of the solar activity on geodynamic processes and confirms possible periodic changes in the Earth radius. An attempt was made to **forecast** volcanic and seismic activity in Earth compression belts up to 2020.

The problem of drift of the Earth geomagnetic poles was considered by different science centers, and the results were reported and versions of further developments **were** proposed.

This book provides information on recent advances in research on gravitational waves, involving latest achievements in Earth sciences, geodynamics in particular.

We tried to show that the problem of gravitational waves, which seemed to be purely astrophysical, is actually concerned with geophysics and geology, and first of all, with geodynamics.

How do gravitational waves, with different amplitude and length, passing through **Earth**, affect geodynamic processes, in what way they are reflected in Earth's deformations, movements of lithospheric plates, internal energy of the planet, which causes changes in seismic and volcanic activity, etc.? An attempt was made to answer, partly, **these** and other questions, not dealt with earlier by Earth sciences in such details.

Experts in astrophysics have not so far managed to register gravitational waves with technical means. But Earth itself is a complicated system, responsive to any external influence. The authors of this monograph tried to use the Earth itself as a detector of gravitational waves or, to be more precise, to use the reaction of geodynamic processes to passing long-range gravitational waves (LGW). The book reports on possible LGW effects on quadrupole deformation of the Earth through spatio-temporal distribution of energy and geodynamic processes. The results of the investigations suggest that the mechanism of LGW effect on the Earth quadrupole deformation is much more complex than a mere change of space sizes under the influence of a gravitational wave.

In our opinion, the assumption that LGW cause quadrupole deformation of Earth was confirmed by the recent discovery, made by Christopher Cox, from Raytheon Research Company, and Benjamin Chao from NASA Center in Maryland, on the basis of

studying long-term variations of the zonal coefficient of second degree spherical harmonics, so-called J_2 coefficient. With the help of satellites, they found out a decrease in its radius at the poles and its increase along the equator. NASA experts have not offered any explanation of the causes of the observed J_2 variation. Nevertheless, we believe that exactly such response of the Earth shape and dimensions can be expected from passage of a gravitational wave through it. These results are discussed in the book taking into account the conception of the authors about possible SGW effects on Earth.

Cycles in the gravitational field of Earth, revealed in the course of geophysical investigation of low-tide gravity variations led to interesting conclusions. Appreciable non-tidal gravity anomalies (0.5-1.5 mGal), occurring 1-3 weeks before severe distant earthquakes, were established with «Binagadi» station (Apsheron Peninsula), which conducted gravity monitoring over the past several years. Surprising are distances, separating the registering station from the centers of future earthquakes, in some cases exceeding 10 thousand km. The obtained results were shown statistically true, being substantiated by continuous observations from January 2004 to June 2008 at the «Binagadi» station (nowadays the observations are continuing). Registration of gravitational prediction in 90% of cases is recorded prior to violent distant earthquakes with a magnitude >6.5 . The book offers a logical explanation of this fact, in particular on the basis of passing under the «Binagadi» station of tectonic waves, prior to strong distant earthquakes. Assumed sources of tectonic waves were discussed.

The influence of the gravitational field of planets of the Solar system on seismic and volcanic events is shown, some calculations are provided and a possible mechanism of this effect is proposed.

Such a vital problem as global climate changes on our planet is also discussed in the book. The comparison of the diagrams showing changes in the average temperature on Earth and eruptions of volcanoes in compression belts of Earth, confirmed that they are well-correlated. The analysis of those diagrams and other parameters allowed suggest that the natural factor rather than technological is the main cause of global climate change. As volcanic eruptions are accompanied by emission into the atmosphere of large amounts of endogenic gases, primarily CO_2 and CH_4 , which are responsible for the manifestation of the greenhouse effect, and, as a consequence, the increase in the average annual temperatures on Earth. High correlation level between the volcanic activity and average annual temperature indicate a dominating influence of the endogenic factor on global climate change.

Probably, most unexpected research results described in this book are those based on the application of a quite new geophysical instrument - torsion detector of long-period gravitational variations (TD LGV) and ANTROPATENA earthquake forecasting station, which are based on the use of the detector..

The physical principle of ANTROPATENA is based on continuous registration of the gravitational constant in two mutually perpendicular directions with simultaneous registration of gravitational acceleration. All the three detectors (Cavendish balance, oriented in two mutually perpendicular directions and high-precision gravimeter-sensors X, Y, Z), are placed into the same glass case with perfect vacuum. Information is received with complicated laser systems and optical matrixes. This device has indicated that variations in the values of the gravitational constant measured in two mutually

perpendicular directions, sometimes do not correlate with each other, and, occasionally, appear in phase opposition.

This fact directly confirms that the measured variations of the gravitational constant do not at all reflect any temporal change of the constant itself, but are relative to the effect of external gravitational fields on the Cavendish balance. It was established that variations of the measured values of the gravitational constant are registered 1-3 weeks before strong distant earthquakes and, most likely, reflect the passage under ATROPATENA station of tectonic waves, which preceded strong earthquakes. The ratio of occurrence of gravitational anomalies, recorded by the X, Y, Z sensors, directly depends on the ATROPATENA orientation in relation to the center of future earthquake.

Thus, the authors believe, that it is possible to end the debates, which have lasted for half a century, pertaining to variations in the measured values of the gravitational constant, registered by many scientists of the world. In the opinion of the authors of this investigation, the answer has been found: the effect of external gravitational fields of geodynamic nature on the Cavendish balance.

Logical continuation of the above research is setting up in 2008 of Global International Network of Earthquake Forecast Station, ATROPATENA, the structure and functioning of which is described in details in this book.

Therefore, the book outlines an attempt to view our planet as an element of a single multifunctional cosmic system, to demonstrate integrity and unity of the nature in its diverse geospheres: tectonosphere, hydrosphere, atmosphere, and magnetosphere, closely interrelated with cosmic factors.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

G - гравитационная постоянная;

СГВ - сверхдлинные гравитационные волны;

МПВ - метрика пространства-времени;

GW— гравитационные волны (*Gravitational Waves*);

С - магматические вулканы поясов сжатия Земли;

Р - магматические вулканы рифтовых зон;

Гр - грязевые вулканы;

ОР - океанские рифтовые вулканы;

ММЭ - метод максимальной энтропии;

МСС- метод скользящей средней;

КВВ - квазиволновые вариации силы тяжести;

ОТО - общая теория относительности;

СТО - специальная теория относительности;

ТДДВГ-торсионный детектор длиннопериодных гравитационных волн.

Глава 1

ИСТОРИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ

1.1. РОЖДЕНИЕ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ

В последние десятилетия в решении проблемы происхождения Солнечной системы и нашей Земли, как ее составного элемента, достигнуты весьма существенные успехи. Тем не менее, некоторые ее стороны, в том числе достаточно важные, вызывают различные толкования.

Пожалуй, все согласны с тем, что исходным веществом для формирования Солнечной системы послужили межзвездные пыль и газы, широко распространенные во Вселенной. Но каким образом в их составе оказался полный набор химических элементов таблицы Менделеева, и что послужило толчком для начала конденсации газа и пыли в протосолнечную туманность? Существуют два варианта ответа на эти вопросы.

Первый путь образования протосолнечной туманности из рассеянных газа и пыли - эволюционный. Он ведет через образование под влиянием гравитационного сжатия сгущений этой материи - молекулярных облаков - к возникновению уплотнений вокруг этих облаков и далее к преобразованию таких уплотнений в молодые звезды типа нашего Солнца, окруженные протопланетным диском. Реальность этого пути недавно подтверждена наблюдениями с помощью методов радиоастрономии и инфракрасной спутниковой астрономии. В результате их применения вокруг молодых звезд типа Т-Таури были обнаружены еще не успевшие рассеяться сгущения газа и пыли, из которых они, очевидно, и образовались. Совсем недавно получены сведения о присутствии планеты на орбите вокруг пульсара PSR 1829-10 близ центра Млечного Пути. Правда, эти сведения были подвергнуты сомнению, но затем последовали новые аналогичные открытия. Пришли сообщения об открытии не только планеты, вращающейся вокруг пульсара PSR 1829-10, но и целой планетной системы (две планеты и более) вокруг пульсара PSR 1257+12 (Wolszozan, Frail, 1992). Параметры масс этих планет,

их орбит, расстояния от центральной звезды и времени обращения вокруг нее вполне сопоставимы с наблюдаемыми у планет Солнечной системы.

Охарактеризованный только что эволюционный путь формирования Солнца и протопланетного диска представляется весьма естественным. Но остается открытым вопрос о происхождении разнообразия химических элементов, если учесть, что такое разнообразие, очевидно, было свойственно уже первичному сгущению межзвездной материи - молекулярному облаку. Вот здесь и приходится привлекать вмешательство «постороннего» (на первый взгляд) фактора - взрыва Сверхновой звезды в окрестностях будущей Солнечной системы. Именно такой взрыв массивной звезды, в недрах и газовой оболочке которой за счет ядерных реакций шел синтез химических элементов (нуклеосинтез), мог привести к появлению на свет разнообразия химических элементов, в том числе естественно радиоактивных (радиогенных), причем многие из последних довольно быстро вымерли. Этот взрыв своей ударной волной мог стимулировать начало конденсации межзвездной материи, приведшей в конечном счете к образованию Солнца и протопланетного диска.

Таким образом, намечается второй путь формирования исходного состояния Солнечной системы. Его можно назвать катастрофическим, если справедливо считать взрыв Сверхновой природной катастрофой. Он заставляет вспомнить о космогонической гипотезе Дж. Джинса, пытавшегося объяснить происхождение планет выбросом солнечной материи под влиянием сближения с Солнцем другой звезды. Гипотезу Джинса в свое время критиковали именно за катастрофизм и апелляцию к случайности как причине образования Солнечной системы.

Но, по существу, столь катастрофисткой была и гипотеза О.Ю.Шмидта, допускавшая захват Солнцем темной галактической туманности, состоящей из пыли и метеоритов, и ничего плохого, в принципе, в этом катастрофизме нет. Ведь в масштабе астрономического времени взрывы сверхновых звезд не представляют собой столь редкого, тем более, исключительного явления - такие взрывы происходят, в среднем, каждые несколько миллионов лет.

К тому же взрыв Сверхновой мог быть лишь первотолчком, инициирующим процесс, который далее разворачивался по своим собственным законам.

Следующая стадия образования Солнечной системы предусматривает распад протопланетного диска на отдельные планеты внешней группы, с поясом астероидов между ними. В расшифровке событий этой стадии достигнуты наиболее серьезные успехи (рис. 1), в значительной мере на основе развития идей О.Ю. Шмидта, вплоть до выведения знаменитого эмпирического закона планетных расстояний Тициуса-Боде. Показано, что промежуточной фазой образования сонма твердых и довольно крупных, до сотен километров в диаметре, тел, именуемых планетезималями, является последующее скопление и соударение, сопровождаемые процессом аккреции (наращивания) планеты. Определено (впервые В.С. Сафроновым), что этот процесс занял не более сотни миллионов лет, т.е. был, с геологической точки зрения, очень быстрым.

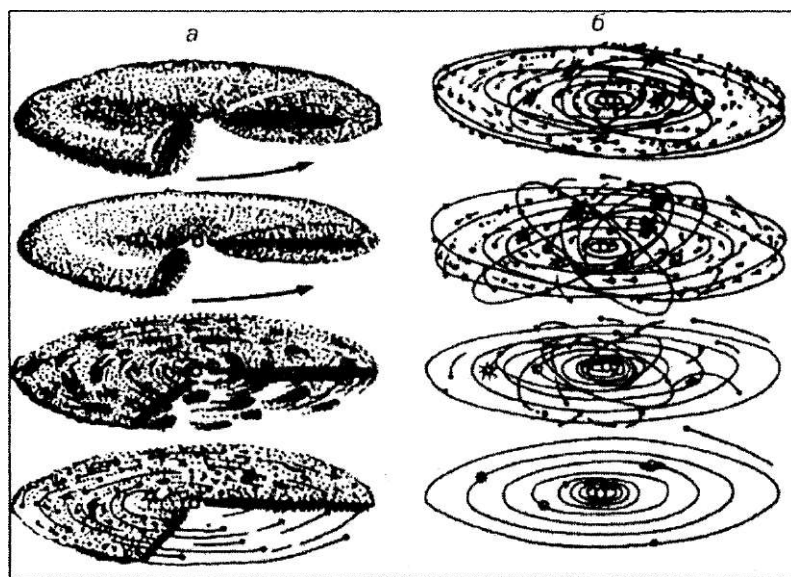


Рис. 1. Эволюция протопланетного диска - теоретическая модель «московской школы» (М.Л. Макалкину, 1993)

а - оседание пыли, уплотнение пылевого субдиска и образование роя планетезималей; б - объединение планетезималей в планеты. Созданная для околосолнечного диска, эта модель в разной степени применима и к протопланетным дискам вокруг молодых звезд солнечного типа

В каком состоянии вышла новорожденная Земля из стадии своей аккреции? Была ли она холодной или горячей, однородной или неоднородной, т.е. ступком тел различного состава и размера или закономерно расслоенной по вертикали? Решение именно этих вопросов имеет наибольшее значение для геологов, для всех исследователей Земли.

Представления о тепловом состоянии новорожденной Земли претерпели в последние десятилетия принципиальные изменения. В противовес долго господствовавшему мнению об «огненно-жидком» исходном состоянии Земли, основанном на космологической гипотезе Канта-Лапласа, с начала XX столетия, в особенно настойчиво в 50-е годы, стала утверждаться идея об изначально холодной Земле, недра которой в дальнейшем начали разогреваться вследствие выделения тепла естественно радиоактивными элементами. Однако уже в 60-70-е годы стало очевидным, что эта концепция не учитывает выделения тепла при ос*дарении планетезималей, особенно большого диаметра. В итоге к настоящему времени почти всеобщее признание получило представление о весьма существенном разогреве Земли, вплоть до начала плавления, если не полного плавления ее вещества, то уже на стадии аккреции (Hayashi et al., 1979; Витязев и др., 1990). Дальнейшим логическим следствием этого является вывод о столь же раннем на-

чале дифференциации Земли на оболочки, и, прежде всего, на силикатную мантию и железное ядро. Этот вывод нашел серьезное подкрепление в исследовании изотопных геохронометрических систем (см. сводку И.Я. Азбель и И.Н. Толстихина (1988)). Его крайним выражением служит идея возникновения уже в начале постаккреционной стадии на поверхности Земли или на небольшой глубине ниже этой поверхности «магматического океана» (Hayashi et al., 1979). Образованию такого «океана» мог способствовать парниковый эффект, созданный плотной первичной атмосферой выделившейся на аккреционной стадии (Kumazawa, Maquyama, 1994). К этому мы еще вернемся ниже.

Следует упомянуть о существовании иных представлений. Некоторые исследователи продолжают придерживаться взглядов об изначально холодном состоянии Земли и ее последующем разогреве, но не столько вследствие выделения радиогенного тепла, сколько под влиянием твердых лунных приливов. Отсюда делается заключение о весьма позднем формировании ядра Земли, на рубеже архея и протерозоя (Сорохтин, Ушаков, 1991), которому, однако, противоречит факт обнаружения остаточной намагниченности пород с возрастом около 3,5 млрд. лет, ибо, как известно, магнитное поле Земли связано с ее жидким ядром.

Была высказана и точка зрения, совершенно противоположная двум вышеприведенным концепциям, исходящим из первоначально более или менее однородного состава Земли: аккреция протекала таким образом, что сначала образовалось ядро Земли из железных метеоритов, а затем оно нарастало мантией за счет падения каменных метеоритов и далее, возможно, земной корой, отвечающей по составу углистым хондритам. Эта гипотеза получила название гипотезы гетерогенной аккреции, в отличие от более распространенного представления о ее гомогенном характере. Она была выдвинута К. Турекьяном в США, в России поддержана А.П. Виноградовым и развита украинским геохимиком Э.В. Собоновичем (1993). Гетерогенная аккреция, по существу, делает ненужной последующую дифференциацию Земли, лежащую в основе всех современных представлений о ее энергетике и эволюции. Но она подвергалась серьезной критике со стороны австралийского геохимика А. Рингвуда (Ringwood, 1979).

Компромиссный вариант между гипотезами гомогенной и гетерогенной аккреции был предложен О.Л. Кусовым и Н.И. Хитаровым (1982). Согласно этому варианту, в ходе аккреции сначала образовалось внутреннее ядро Земли, а остальные оболочки, включая внешнее ядро, являются продуктом дифференциации. Несомненно, это представление более приемлемо, чем гипотеза гетерогенной аккреции в ее крайней форме. Новейшие взгляды на строение и развитие ядра Земли допускают постепенный и даже продолжающийся и в современную эпоху рост внутреннего ядра за счет внешнего, благодаря дифференциации вещества последнего на металлическую (Fe-Ni), уходящую во внутреннее ядро, и неметаллическую (O, S, Si) фазы в процессе общего охлаждения Земли. Эта дифференциация должна носить экзотермический характер и может являться одним из источников внутреннего тепла Земли.

В общем, наиболее вероятным сценарием начальной стадии развития Земли был следующий: быстрая аккреция с участием не только газов, пыли и мелких, но • крупных планетезималей, возможно, с тенденцией некоторого обогащения рангах порций аккретирующего вещества более тяжелыми, металлическими компонентами; разогрев в процессе аккреции вплоть до частичного (по крайней мере) плавления, приведшего к началу дифференциации Земли на ядро и мантию.

С вопросом о происхождении Земли тесно связан другой вопрос - о происхождении ее единственного спутника Луны. Решение последнего важно для геологов, поскольку Луна первоначально должна была находиться на относительно **небольшом** (но не меньшем, чем предел Роша) расстоянии от Земли и оказывать существенное воздействие на динамику ее верхних оболочек своим приливным воздействием. Любые гипотезы происхождения Луны должны учитывать **некоторые** твердо установленные факты: 1) Луна должна была возникнуть не позднее **4,1 млрд.** лет т.н. - возраста ее древнейших базальтов, т.е. либо одновременно с **Землей**, либо вскоре после окончания ее формирования; 2) состав лунных пород **близок** к составу мантии Земли, отличаясь в основном лишь пониженным содержанием летучих; 3) железное ядро у Луны отсутствует, судя по ее плотности, **сравнимой** с плотностью мантии Земли, и по отсутствию магнитного поля (слабое поле существовало в прошлом).

Выдвинутые для объяснения происхождения Луны гипотезы в разной степени учитывают эти ограничения, но они недостаточны для однозначного решения вопроса.

Согласно одной из гипотез, Земля и Луна образовались одновременно из **одного** и того же газопылевого облака, но в случае гомогенной аккреции они должны иметь одинаковый состав, чего в действительности не наблюдается. Другая гипотеза принимает, что Луна оторвалась от Земли на ранней стадии ее истории, **вгда** последняя была расплавленной и очень быстро вращалась. Но эта гипотеза **не** объясняет вращение Луны не в плоскости земного экватора, а также распределение моментов количества вращения в системе Земля-Луна. Третья гипотеза - **захвата** Луны Землей - допускает ее независимое от Земли образование. Новейший вариант этой гипотезы недавно разработан О.Г. Сорохтиным и С.А. Ушаковым (1991). Он предусматривает приближение к Земле гипотетической Протолуны ее разрушение по достижении предела Роша* под влиянием гравитационного воздействия Земли и воссоздание Луны из обломков, оказавшихся за **пределом Роша**.

Другой вариант катастрофической модели, выдвинутый американскими учеными У. Хартманом (1985 г.) и Д. Дэвисом в (1975 г.) и вскоре завоевавший **зна-**чительную популярность и почти превратившийся в парадигму — эта гипотеза • **Дсого** удара о Землю крупного тела размером примерно с Марс (0,5 диаметра и

* Предел Роша - расстояние около 2,5 земного радиуса, на котором еще сказывается притяжение **Зехли**. заставляющие тело падать на Землю.

0,1 объема Земли). Последствиями этого удара должны были быть превращение материала «пришельца» в парообразное вещество («вапоризация») и выброс материала земной верхней мантии. Весь тот материал частично должен был упасть обратно на Землю, но той его доли, которая оказалась за пределом Роша, должно быть достаточно, чтобы образовать Луну, а силы выброса - чтобы придать ей необходимое ускорение.

В дальнейшем эта гипотеза подверглась математической разработке и получила подтверждение моделированием на ЭВМ. Некоторые возражения были, однако, выдвинуты А. Рингвудом с сотрудниками, указавшими, что по содержанию ванадия, хрома и марганца Луна очень сходна с мантией Земли, что свидетельствует против гипотезы Сорохтина-Ушакова, но не противоречит гипотезе «гигантского импакта» Хартмана-Дэвиса, так как последняя вполне допускает участие выброшенного при ударе астероида земного вещества в формировании Луны. Для нас последняя гипотеза привлекательна и тем, что она может помочь в объяснении диссимметрии Земли.

Итак, стадия аккреции должна была завершиться формированием горячей, в верхней части, вероятно, расплавленной Земли, начавшей испытывать дифференциацию на оболочки (Витязев и др., 1990). Очень скоро же возле Земли появился спутник Луна, начавший оказывать на нее мощное приливное воздействие.

Эти выводы явились результатом более тонких геохимических исследований, показавших, что содержание сильно сидерофильных элементов (в частности, Au , Pt , Pd , Re , Os , Ru , Rh , Ir) в мантии намного выше, чем можно было ожидать, если бы ядро Земли образовалось за счет сепарации железа и силикатов, и для перечисленных элементов все еще очень близко к среднему содержанию в Солнечной системе. Более детально картина аккреции Земли рисуется в следующем виде. На первой стадии материал солнечной туманности аккретирует в сильно восстановительных условиях; плотный, обогащенный железом металл отделяется от силикатов и просачивается вниз, образуя ядро и унося все сидерофильные элементы из протомантии. На следующей стадии к системе добавляется окисленный первичный материал, который в основном остается в мантии. Однако небольшая доля его уходит в ядро, лишая мантию сидерофильных элементов, только что в нее внесенных. На этой стадии устанавливается современное содержание умеренно сидерофильных элементов. Наконец, на последней стадии добавление новой порции материала восстанавливает содержание высокосидерофильных элементов в мантии.

Эксперименты по разделению элементов и их соединений при ультравысоких давлениях (>100 ГПа) и температурах ($>4000\text{K}$) не только подтвердили изложенную модель, но и позволили выяснить, что примесь к железо-никелевому сплаву, составляющая во внешнем ядре около 10%, образована в основном кремнием; содержание же других элементов - серы, кислорода, углерода, водорода - не может превышать 2-3 %.

Между тем, ранее некоторые исследователи, в частности А.А. Маракушев и американский геофизик Р. Жанлоз, допускали присутствие во внешнем ядре значительного содержания водорода. Это мнение получило подкрепление в опытах Дж. Баддинга и его коллег из Института Карнеги. Они обнаружили, что при сверхвысоких давлениях образуется гидрид железа, который сохраняется до давлений в 62 ГПа (сообщение J. Johnson в журнале «New Scientist», 1991, № 1781). По мнению А.А. Маракушева, присутствие водорода в глубоких недрах Земли играет огромную роль в ее развитии.

Таким образом, вырисовывающаяся, по новейшим данным, модель аккреции Земли сочетает черты гомогенной и гетерогенной аккреции, подобно упоминавшейся модели Кускова-Хитарова, и оставляет место для последующей дифференциации земного вещества.

Проблема происхождения Луны интересно обсуждалась в №3 журнала «Природа» за 1994 г. Здесь получили отражение две версии образования нашего спутника. Одна из них принадлежит А.А. Маракушеву (1992) и основывается на разработанной им же кометной гипотезе образования Солнечной системы, существенно отличающейся от изложенной в этой книге метеоритной гипотезы. Согласно А.А. Маракушеву, планеты земной группы первоначально имели флюидные (в основном водородные) оболочки, которые затем были удалены солнечным ветром). Исходным материалом для построения планет было кометное вещество, состоявшее из водородного льда с «хвостом» из рыхлого пылевого материала, а вещество, подобное метеоритам, образовалось уже путем дифференциации после аккреции кометного вещества с разделением на ядра, подобные железным метеоритам, и мантию, по составу близкую к каменным метеоритам. Образование спутников всех планет, по А.А. Маракушеву, происходило практически по одному закону - при обособлении железо-каменного ядра от флюидной оболочки планеты приобретали осевое вращение, а центробежная сила приводила к отделению и выбросу силикатного и флюидосиликатного вещества, которое и сформировало спутники, в том числе и Луну.

Другая версия, получившая теперь название гипотезы «Великого столкновения», представлена в «Природе» статьей американского астронома А. Камерона. Этот исследователь, независимо от У. Хартманна и Д. Дэвиса выдвинувший вместе с У. Уордом гипотезу мегаимпакта, исходил из необходимости объяснить распределение угловых моментов вращения в системе Земля-Луна. В итоге они пришли к гипотезе мегаимпакта, а в ее подтверждение А. Камерон предпринял математическое моделирование предполагаемого столкновения и получил результаты, которые изложил в своей статье. Ее обстоятельно комментирует А.В. Бялко, приводящий ряд дополнительных доказательств реальности «Великого столкновения». Он указывает, что некоторые расхождения между расчетами А. Камерона и действительностью, касающиеся значительно большего удаления Луны от Земли и характера ее обращения вокруг последней, не противоречат данной гипотезе, а, напротив, из нее следуют. Далее А.В. Бялко отмечает, что Земля об-

ладает аномально высокой плотностью по сравнению с той, которую она должна была бы иметь исходя из расстояния до Солнца, а Луна, наоборот, более низкой по сравнению со спутниками других планет. Это, по А.В. Бялко, также является следствием «Великого столкновения» и не укладывается в гипотезу А.А. Маракушева.

Должны еще отметить, что на раннюю дегазацию Земли на основании изучения изотопии благородных газов, кроме русских ученых И.Я. Азбель и И.Н. Толстихина, указал и английский ученый Г. Тернер в 1989 г. Он считает, что высокое отношение изотопов $^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ в базальтах срединно-океанских хребтов в сочетании с данными по отношению изотопов аргона $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ указывает, что 80% газов или более выделилось в первые 50 млн. лет истории Земли (J. Geol. Soc. 1989. Vol. 146 P. 147-154).

Во второй половине 90-х годов были достигнуты впечатляющие успехи в деле открытия планетных систем вокруг молодых звезд. Если раньше, начиная с 1992 г., существование планет только подозревалось, и то вокруг пульсаров, а не звезд, подобных нашему Солнцу, начиная с 1995 г. буквально посыпались сообщения о подобных открытиях, и к апрелю 1999 г. их насчитывалось уже целых 17. Однако к этому моменту речь шла об обнаружении одиночных планет - по одной на каждую звезду. И вот, в апреле 1999 г., появилось сенсационное сообщение об открытии сразу трех планет вокруг звезды Упсилон Андромеды (рис. 2), т.е. настоящей планетной системы, подобной нашей Солнечной (Lissauer, 1999; Schneider, 1999). Первоначально все открытые планеты по размеру были сравнимы с Юпитером, т.е. с внешними планетами-гигантами Солнечной системы.

Следует сказать, что все эти открытия совершены еще косвенным методом - по спектроскопически фиксируемому доплеровскому смещению линий пог-

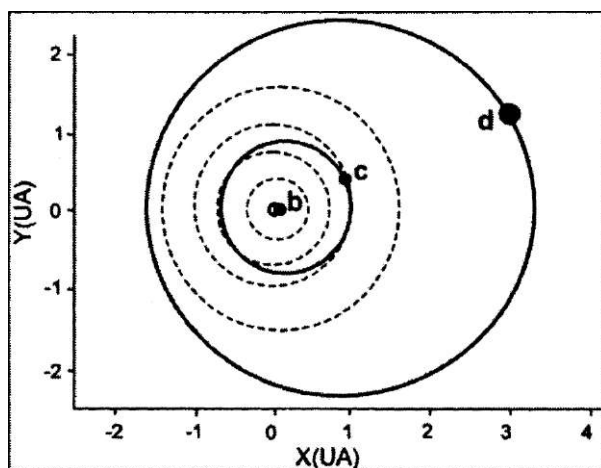


Рис. 2. Упсилон Андромеды и ее три планеты (Schneider, 1999)

лощения света, исходящего от центральной звезды, под влиянием окружающих ее планет. Однако уже в том же 1999 г. впервые удалось изучить доплеровское смещение света, отраженного от самой планеты. Это дало возможность непосредственно определить массу и размеры планеты. В обоих случаях, когда такие планеты были обнаружены, их размер оказался близким к размеру Юпитера, а состав, скорее всего, газовым - водородным (Burrows, Angel, 1999).

Тем временем с помощью ультраширокой (36 км) системы радиотелескопов (числом 47) в межзвездном облаке Линде 1551 удалось обнаружить образование двух новых звезд, вокруг которых формируются протопланетные диски. Диаметр этих дисков равен радиусу Солнечной системы до Сатурна включительно; образуются они за счет истечения газа из протозвезд (Boss, 1998).

Эти новые наблюдения фактически подтверждают реалистичность той картины происхождения Солнечной системы из газопылевого диска, которая была впервые намечена еще в небулярной гипотезе Канта-Лапласа в XVIII веке.

Новые данные сделали также гораздо более правдоподобными предположения о решающей роли взрывов сверхновых звезд в качестве стимула образования Солнечной системы и источника разнообразия химических элементов, **слагающих** входящие в нее небесные тела. По данным, приведенным в статье (Burrows, 2000), во Вселенной происходит взрыв сверхновой звезды, а в нашей Галактике такой взрыв наблюдается каждые 30-50 лет, и в течение последнего тысячелетия люди смогли наблюдать шесть подобных взрывов. Так что говорить о случайности здесь не приходится. Следует еще сказать, что во Вселенной происходят **и** неизмеримо большие события катастрофического характера - взрывы целых галактик, причем они могут стимулировать взрывы сверхновых (Vielleux et al., 1996) и оказывать воздействие на земные процессы (Афанасьев, 1997). Отметим **еще** оригинальный взгляд, высказанный в работе (Boehnhardt, 2001).

Получило дальнейшее развитие в последние годы и представление о ранней дифференциации Земли на оболочки - ядро, мантию и даже кору (Витязев, Печерникова, 1996 и др.). В отношении формирования ядра эксперименты показали, что оно возможно лишь из «магматического океана» (Ballhaus, Ellis, 1996), но не путем просачивания металлической фазы из мантии, т.е. перколяции, как все *же* допускается некоторыми исследователями (Bruhn et al., 2000). Сама гипотеза образования на стадии аккреции магматического океана также продолжала занимать внимание ученых. По заключению японского ученого Ютака Абе, «... с теоретической точки зрения трудно вообразить аккрецию Земли без образования того или иного типа магматического океана» (Abe, 1997, с. 27). Он отмечает, что тепло, необходимое для плавления мантии, могло иметь разное происхождение: соударение планетизималей в процессе аккреции, парниковый эффект протосферы, импактное воздействие в особенности мегаимпакт, приведший к образованию Луны. В зависимости от преобладающего источника тепла магматический океан мог иметь разную глубину, максимальную под влиянием мегаимпакта.

Ранняя дифференциация подтверждается изотопно-геохимическими данными. Уже древнейшие базальтоиды Канады и Гренландии имеют своим источником деплетированную мантию, а древнейшие обломочные цирконы Австралии с возрастом 4,14 млрд. лет обнаруживают признаки образования за счет переплавления значительно более древней коры (Amelin et al., 1999).

Что касается происхождения Луны, то наиболее популярной по-прежнему остается гипотеза гигантского импакта. На ее основе предпринята попытка смоделировать этот процесс, схематически изображенный на рис. 3а. Моделирование показало, что Луна могла сформироваться за счет конденсации диска, состоящего из выброшенных импактом обломков прото-Земли, чрезвычайно быстро, чуть ли не меньше, чем за год (Ida et al., 1997). Вместе с тем соображения, основанные на сравнении изотопных соотношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ древнейших земных и лунных пород,

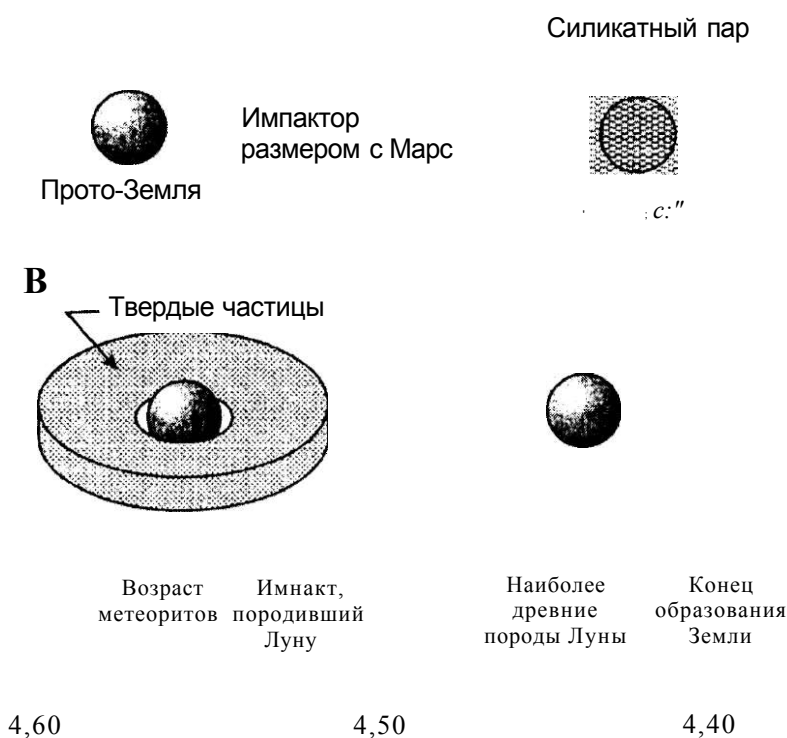


Рис. 3. Образование Луны (Ida et al., 1997) и возраст (De Paolo, 1994)

а - схематическая иллюстрация образования Луны в результате гигантского импакта: А - тело размером с Марс сталкивается с прото-Землей; Б - атмосфера из горячего силикатного пара; В - диск из твердых частиц, из которого аккрецируется одна или большее число лун; Г - удаление образовавшейся Луны (лун) вследствие приливного взаимодействия с Землей, б - возраст Луны, млрд. лет

приводят к выводу, что Луна должна была образоваться еще до окончания аккреционного формирования Земли (De Paolo, 1994), что показано на рис. 36.

Временные соотношения периода аккреции Земли и мегаимпакта, породившего Луну, удалось уточнить в результате изучения системы ^{82}Hf - ^{182}W и изотопов Pb (Haliday, 2000). Длительность аккреции оценивается в 25-40 млн. лет и принимается, что Земля к моменту мегаимпакта была сформирована более чем на 50 и до 65%, а -25% ее массы добавилось уже после этого события.

Выше излагались результаты исследований, выполненных в основном в рамках господствующей в настоящее время концепции происхождения Земли и Солнечной системы, так сказать, «мейнстрима». Между тем, в нашей стране продолжали разрабатываться и альтернативные концепции. О двух главных из них, принадлежащих А.А. Маракушеву и О.Г. Сорохтину, уже шла речь в настоящей главе. Но в последние годы эти исследователи продолжали работать в избранных направлениях и публиковать итоги своих работ; кратко остановимся на содержании этих публикаций (Маракушев, 1999, 2000; Сорохтин, 1999).

А.А. Маракушев (2000) в своем недавнем обобщении комментировал сообщения об открытии новых планетных систем и увидел в нем подтверждение ранее высказанных им взглядов. При этом он основывается на том, что во вновь открытых системах обнаружены лишь планеты, сопоставимые по размерам с Юпитером, т.е. обладающие мощными газоледяными оболочками. Он, очевидно, полагает, что планеты, подобные планетам земной группы, т.е. чисто железо-силикатные, в них отсутствуют, но это было опровергнуто новыми открытиями. Соответственно А.А. Маракушев развивал в этой статье основные тезисы концепции: 1. Солнечная система образовалась из газопылевого кометоподобного скопления, оставшегося от взрыва Сверхновой. 2. Планеты сформировались раньше Солнца. 3. Планеты земной группы первоначально, подобно планетам-гигантам, обладали мощной газовой оболочкой, впоследствии унесенной солнечным ветром. 4. Под давлением этой оболочки и произошло плавление и дифференциация железо-силикатного ядра. 5. Луна отделилась от Земли в результате быстрого вращения прото-Земли и имеет, таким образом, то же происхождение, что и спутники Юпитера, из которых ее наиболее близким аналогом является Ио.

Построениям А.А. Маракушева нельзя отказать во внутренней логике, особенно в отношении происхождения Луны, которое уже не выглядит чем-то исключительным по сравнению с образованием спутников других планет, хотя сам механизм ее отделения от Земли остается не очень ясным.

О.Г. Сорохтин (1999) в своей работе подробно развивает ранее предложенную модель раннего развития Земли и образования Луны, в которой принимается, что Земля до 4,0 млрд. лет т.н. оставалась холодной и не проявлявшей тектоно-магматической активности, ее ядро выделилось лишь в конце архея, а Луна возникла вследствие разрушения гипотетической прото-Луны, приблизившейся к Земле, на пределе Роша. Первому выводу явно противоречат уже достаточно обильные

изотопно-геохимические данные (Sm-Nd, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Hf-W, Pb, благородные газы), а второй вывод, как и построения А.А. Маракушева, пока не поддается экспериментальной проверке. Следует, однако, отметить, что в данной работе О.Г. Сорохтина представления об аккреционном разогреве Земли и ранней ее дифференциации с выделением ядра подвергнуты детальному критическому разбору.

Возвращаясь к вопросу о происхождении Луны, кратко остановимся еще на представлениях Э.М. Галимова (1995), отвергающего гипотезу мегаимпакта. Как и А.А. Маракушев, он придерживается концепции образования Солнечной системы из газопылевого сгущения, но предполагает совместное образование Земли и Луны в качестве двойной планеты, приводя в пользу такого толкования в основном геохимические аргументы.

В последние годы изучение космических объектов развивалось настолько стремительно, что дало основание одному из американских астрономов начать свою статью в журнале «Science», посвященную исследованию галилеевых спутников Юпитера космическим аппаратом Galileo, следующими словами. «Мы живем в возбуждающее время для всех людей, которые интересуются происхождением планет. Регулярно открываются новые планеты и новые планетные системы, и они могут быть сопоставлены с нашей собственной Солнечной системой. В нашей Солнечной системе галилеевы спутники, которые вращаются вокруг Юпитера, образуют планетную систему, которая также оказалась в центре внимания благодаря замечательному успеху миссии Galileo» (Stevenson, 2001, p.71). Кстати, важнейший вывод из наблюдений с этого космического аппарата, сделанный автором статьи, состоит в том, что «наша Солнечная система, система Юпитера и система Земля-Луна обладают отчетливо различной динамикой (Stevenson, 2001, p.72). Можно заметить, что этот вывод противоречит мнению некоторых наших специалистов.

Другое важное открытие самого последнего времени - это открытие вокруг одной из массивных протозвезд, G 192 S1, настоящего аккреционного диска размером примерно в нашу Солнечную систему. Масса протозвезды составляет от 8 до 10 масс Солнца, диаметр аккреционного диска - 130 астрономических единиц, а масса диска - порядка массы протозвезды (Shepherd et al., 2001). Это открытие подтверждает современные космогонические сценарии.

Отметим, наконец, что, по мнению автора заметки в том же журнале «Science», посвященной результатам изучения Луны аппаратами «Клементина» и «Лунар Орбитер», полученные данные, в частности, касающиеся химического состава лунных пород, подтверждают модели лунного магматического океана и ее происхождения вследствие гигантского импакта (Spudis, 2001).

В заключение рассмотрения проблемы происхождения Солнечной системы можно констатировать, что к настоящему времени подавляющее большинство российских (Витязев и др., 1990) и зарубежных (Russell, 2007) исследователей практически пришли к консенсусу относительно наиболее вероятного сценария ее формирования. Этот сценарий включает три стадии:

1. Возникновение 4568-4570 млн. лет т.н. новой звезды - Солнца и вокруг него газопылевого диска, как это обнаружено телескопом Спитцер вокруг некоторых молодых звезд. Материалы газопылевого диска включали и продукты взрыва Сверхновой в виде тяжелых радионуклеидов. Этот взрыв и послужил вероятным импульсом к формированию Солнца и газопылевого диска вокруг него. Данная стадия могла быть очень скоротечной - всего несколько сотен тысяч лет.

2. Материал газопылевого диска начал конденсироваться под действием гравитации с образованием планетезималей километровой, вплоть до сотен километровой размера. Именно из них потом стали формироваться планеты, их остаток составляют астероиды, образующие пояс между Марсом и Юпитером. Данная стадия могла длиться несколько миллионов лет.

3. Гравитационная аккреция планетезималей дала начало образованию планет. Планеты земной группы возникли во внутренней части протопланетного диска, где температура превышала 0° , а остальные, состоящие в основном из льда - во внешней части диска, где температура ниже. Стадия аккреции длилась несколько десятков (до 100) миллионов лет. Через 50-70 млн. лет после ее начала в результате грандиозного импакта произошел выброс материала, из которого возникла Луна.

1.2. ОБРАЗОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Время, отделяющее стадию завершения формирования нашей планеты, ее аккреции, от возраста древнейших известных на Земле пород и составляющее более 0.5 млрд. лет, до настоящего времени почти не охарактеризовано геологическими документами, если не считать очень важную находку в западноавстралийских кварцитах с возрастом порядка 3,5 млрд. лет обломочных зерен цирконов с возрастом до 4,3-4,4 млрд. лет. Поэтому судить об условиях, в которых развивалась Земля, ее кора и поверхность на этом этапе (4,6-3,9 млрд. лет), приходится по косвенным данным, широко привлекая сравнительно-планетологические материалы. В связи с этим неудивительно, что в освещении данного этапа существуют значительные разногласия.

Подобно тому, как новорожденная Земля совсем недавно рассматривалась как холодное тело, еще не вступившее в процесс дифференциации или, напротив, претерпев такую дифференциацию уже в процессе аккреции, предполагалось, **что** на интересующей нас здесь стадии Земля, аналогично Луне, была еще лишена гидросферы и атмосферы, не говоря уже о биосфере, а главным агентом, изменявшим ее поверхность, были метеоритные бомбардировки, основной период которых, опять же по сходству с Луной, принимается в 4,2-3,9 млрд. лет т.н. Соответственно, данная стадия развития Земли получила название лунной (А.Л.Павлов). Представление об этой стадии было развито в работах М.В. Муратова (1975), а затем Е.В. Павловского, М.З. Глуховского (1990) и др.

При том, что в этих представлениях имелась значительная доля истины, современные данные заставляют внести в них определенные правки. В первую очередь они касаются состояния верхней части твердой Земли, которое, должно было быть близким к расплавленному. Из этого следует возможность выплавления из верхней мантии первичной коры Земли, которая, скорее всего, имела коматиит-базальтовый состав. В нижней части эта кора, по аналогии с Луной, могла быть полнокристаллической, в основном полевошпатовой, сходной с габбро-анортозитовой (Рудник, Соботович, 1991). Если «магматический океан» не достигал земной поверхности, а располагался на некоторой, но, очевидно, небольшой глубине (Федорин, 1991), то вполне возможно, что метеоритные удары пробивали верхний твердый или ранее отвердевший слой и провоцировали базальтовые излияния, подобно тому, как это имело место в лунных «морях» (Wichman, Schultz, 1990).

В пользу существования первичной базальтовой (или близкой по составу) коры Земли свидетельствует не только аналогия с Луной, где подобные базальты имеют возраст до 4,2 млрд. лет, но и то обстоятельство, что для образования на следующем этапе истории Земли протоконтинентальной «серогнейсовой» коры необходимо было переплавление огромного объема базальтового материала (Богатиков и др., 1989, 1991).

Доказательством достаточно раннего плавления коры является то, что древнейшие, раннеархейские, породы по своим изотопным (Nd, Sr) характеристикам обнаруживают происхождение из деплетированной, т.е. обедненной литофильными элементами, мантии, сформированной задолго до их появления (Балашов и др., 1991; Рябчиков, Брай, 1991 и др.). А в древнейших метеоосадочных породах теми же методами устанавливается примесь материала еще более древних пород (Балашов и др., 1991).

Было бы весьма соблазнительно усматривать реликты первичной коматиит-базальтовой коры Земли в ксенолитах (если только это не будины) амфиболитов и ультрамафитов, часто встречающихся в серых гнейсах архея, в том числе в древнейших. К сожалению, не существует соответствующих радиологических датировок этих ксенолитов, либо эти датировки указывают на более молодой, архейский возраст. В некоторых случаях он близок к возрасту древнейших гнейсов, например в Среднеприднепровском блоке Украинского щита (Богатиков и др., 1986). Следует, однако, учитывать трудности изотопного датирования метаморфизованных мафитов и ультрамафитов. Тем не менее, вся совокупность косвенных данных, убедительно суммированных О.А. Богатиковым и др. (1991), свидетельствует в пользу былого существования древнейшей коры основного-ультраосновного состава.

В отличие от Луны, Земля могла довольно рано обрести атмосферу, причем достаточно плотную. Эта атмосфера не могла сформироваться за счет газовых компонент протопланетного диска, ибо последние были отеснены солнечным ветром за пределы зоны формирования планет земной группы. Но она могла

начать образовываться уже в период аккреции при соударении планетезималей (Matsui, Abe, 1986). На раннее формирование земной атмосферы указывает и изотопия благородных газов (Толстихин, 1991). По составу эта атмосфера, развееется, должна была сильно отличаться от современной; скорее всего, она состояла в основном из CO_2 , а также NH_3 , водяного пара, возможно H_2S , HCl , CH_4 . По расчетам Т. Матсуи и Ю. Абе, уже в этой протоатмосфере могло содержаться количество водяного пара (10^{21} кг), сравнимое с массой воды, содержащейся в современных океанах. Эта атмосфера способствовала, очевидно, энергичному выветриванию первичной коры, что, в свою очередь, могло привести к обогащению поверхностного слоя SiO_2 и Al_2O_3 (Ohtani, 1988).

3,9-3,8 млрд. лет т.н. температура земной поверхности должна была снизиться до величины, допускающей существование жидкой воды. Об этом свидетельствует присутствие железистых кварцитов, отложенных из водной среды в одном из древнейших известных на Земле комплексов Исуа в Гренландии, а также многочисленные включения аналогичных пород во многих других «серогнейсовых» комплексах с возрастом более 3,5 млрд. лет.

Представление об очень раннем образовании континентальной (протоконтинентальной) коры получило дальнейшую поддержку на годичном собрании Американского геологического общества в 1993 г. в выступлении С. Боуринга и некоторых других участников собрания (см. статью Р. Кегг в журнале «Science», 1993, %ol. 262, p. 992-993). С. Боуринг пришел к такому выводу на основании изучения распределения редкоземельных элементов и изотопов неодима в древнейших, с возрастом около 4 млрд. лет, гнейсах Акаста в эократоне Слейв Канадского щита. Такое распределение, по мнению С. Боуринга, могло сложиться лишь в результате рисайклинга («переколачивания») еще более древней континентальной коры.

Начало 2001 года ознаменовалось сенсацией - в журнале «Nature» были опубликованы статьи (Halliday, 2001; Wilde et al., 2001; Mojzsis et al., 2001), в которых сообщается, во-первых, об обнаружении среди западноавстралийских обломочных цирконов зерна с возрастом 440 ± 8 млн. лет, т.е. всего на 130 млн. лет моложе времени образования нашей планеты, оцениваемого в 4566 млн. лет, и определение в этих цирконах повышенного содержания тяжелого изотопа кислорода ^{18}O . Последнее доказывает, по мнению авторов, что уже в это время 4,3-4,4 млрд. лет т.н., на Земле существовала жидкая вода, а материнскими породами цирконов были гранитоиды, т.е. была и континентальная кора. Тем не менее, признается, что эти гранитоиды должны были образоваться за счет частичного плавления мафитовой коры, которая тем самым сохраняет право считаться первичной корой Земли. Новейшие представления о событиях первых сотен миллионов лет истории Земли А. Халлидей изобразил на схеме, которая здесь и воспроизводится (рис. 4).

В конце 2000 г. в журнале «Геохимия» была опубликована статья О.И. Яковлева, О.П. Дикова и М.В. Герасимова (Яковлев и др., 2000), имеющая непосредственное отношение к теме настоящей главы. Авторы рассматривают аккрецию

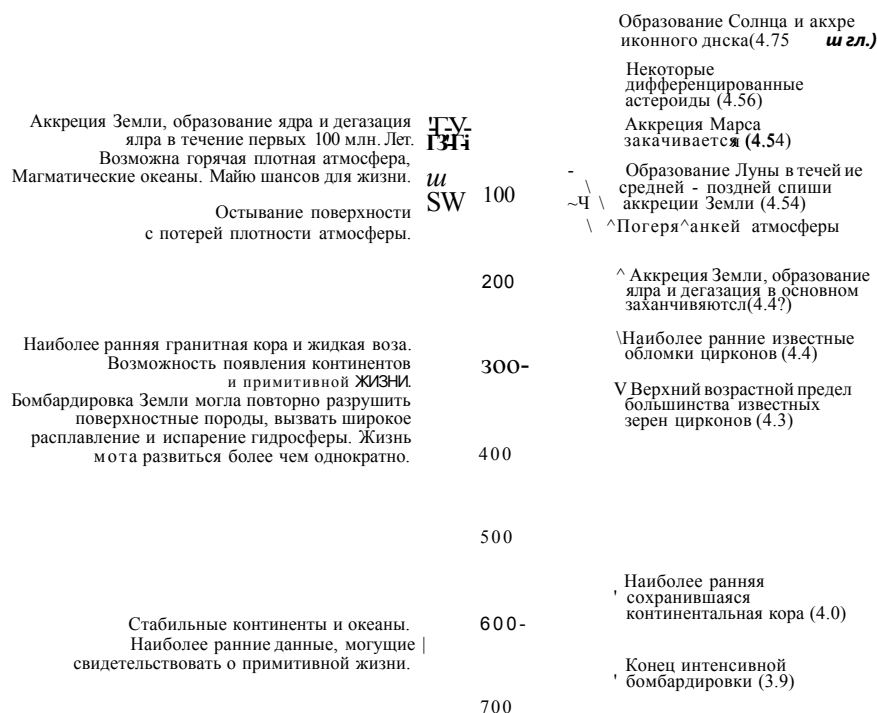


Рис. 4. Наиболее ранняя история Земли (млн. лет), начиная с образования Солнечной системы (Halliday, 2001)

нашей планеты в свете концепции, разработанной В.С. Сафроновым, А.В. Витязевым и их зарубежными единомышленниками, и различают в истории аккреции три фазы: 1 - первая главная фаза, активного роста, когда образовалось 93-95% массы планеты, закончившаяся ~4,4 млрд. лет т.н.; 2 - вторая фаза медленного разрастания до современных размеров, завершилась 4,2 млрд. лет т.н.; 3 - третья фаза, характеризовавшаяся относительно редким падением крупных тел, длилась до 3,9-3,6 млрд. лет т.н. Авторы подчеркивают ведущую роль в аккреции ударного процесса и считают, что именно он, обеспечивая разогрев и «практически полное переплавление вещества» планеты, был главной предпосылкой ее начальной дифференциации. Далее в статье содержится довольно полный обзор существующих представлений об образовании и составе первичной коры Земли. Подтверждается наибольшая вероятность базальтового состава этой коры, меньшая - ее бонинит-марианитового или анортозитового состава. Однако самым интересным в этой работе является обоснование возможности образования гранитоидов (авторы пишут осторожно - «гранитного вещества») уже на стадии аккреции. Рассматривая возможный механизм этого процесса и упоминая его два

варианта - чисто магматическая и флюидно-магматическая (в стиле Д.С. Коржинского) дифференциация - авторы отдают предпочтение механизму, названному ими ударно-испарительной дифференциацией. Она предусматривает селективное плавление и испарение силикатного вещества под ударным воздействием и, в сочетании с двумя первыми механизмами, образование гранитоидов уже на ранней стадии аккреции непосредственно из пара базальта. Авторы подтверждают свои выводы результатами экспериментов по испарению вещества главных горных пород. Добавим от себя, что, приведенные выше в этой главе и еще не известные О.И. Яковлеву и его коллегам в момент написания своей работы, данные по древнейшим цирконам Австралии вроде бы подтвердили их выводы о возможности раннего гранитообразования. Отметим, однако, что они были подвергнуты серьезным сомнениям.

1.3. СЕРЫЕ ГНЕЙСЫ И ЗАРОЖДЕНИЕ КОНТИНЕНТОВ

Примерно до 4,2-4,0 млрд. лет т.н. Земля развивалась аналогично другим планетам земной группы. Начиная же с этого рубежа ее развитие пошло по другому пути, выражением чего стало формирование континентальной коры и разделение земной поверхности на участки суши и морские (в дальнейшем океанские) бассейны.

Первичная континентальная кора отличалась от той, которая в настоящее время составляет фундамент континентальных платформ - кратонов, меньшим содержанием кремнезема и щелочей, особенно оксида калия. Поэтому правильнее ее называть протоконтинентальной.

Повсеместно, где эта кора сохранилась и выступает на поверхность, она представлена довольно однообразной ассоциацией пород, которая была сначала названа серыми гнейсами, а в настоящее время более точно именуется тоналит-тродьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциацией. Судя по находкам цирконов с возрастом $4,3^{+1,4}$ млрд. лет в Западной Австралии и по раннему появлению депленированной мантии, формирование «серогнейсовой» коры могло начаться уже в то время, если не раньше, но, поскольку самих пород древнее 4 млрд. лет пока не обнаружено, основной период ее становления начался лишь на этом последнем рубеже. Он продолжался в течение раннего и среднего архея и позднее, вплоть до современной эпохи, когда образование аналогичной породной ассоциации наблюдается на активных окраинах континентов там, где субдукции подвергается молодая (не древнее 20-30 млн. лет) океанская кора (Drummond, Defant, 1990). Однако период, когда «серогнейсовая» кора была единственным представителем коры континентального типа, отвечает лишь раннему и среднему архею, т.е. длился только до 3,2-3 млрд. лет т.н., поскольку в позднем архее началось обра-

зование уже зрелой континентальной коры, вскоре занявшей господствующее положение. Более того, уже в среднем архее, т.е. с 3,5 млрд. лет т.н., если не раньше, началось развитие гранит-зеленокаменных областей, в дальнейшем составивших основную часть фундамента кратонов - ядер современных континентов. Поэтому главный период формирования протоконтинентальной коры ТТГ-состава - это ранний архей (4-3,5 млрд. лет т.н.).

Собственно гнейсы ТТГ-ассоциации могут возникнуть различными способами. Первоначально допускалось, что они являются продуктом непосредственного плавления мантии. Это отвечало взгляду на данные породы как представляющие древнейшую кору Земли. Но в дальнейшем было показано, что продуктом такого плавления могут быть породы не кислее андезито-базальтов, щелочных базальтов или бонинитов. Другой путь образования ТТГ-ассоциации - фракционная кристаллизация базальтовой магмы. Но такая кристаллизационная дифференциация должна вести к формированию не только ТТГ, но и всей гаммы от базальтов через андезиты до дацитов и риолитов (последние две породы являются аналогами ТТГ). Но в раннем и среднем архее породы среднего состава - андезиты-диориты - очень редки. Кроме того, пропорция кислых пород ТТГ-состава по отношению к средним и основным при такой дифференциации должна быть невелика. Отсюда, кстати сказать, редкость трондьемитов (плагиогранитов) в современной океанской коре; между тем в раннем-среднем архее соотношения были обратными.

Поэтому вслед за авторами работ (Drummond, Defant, 1990; Rapp et al., 1999) следует принять, что наиболее вероятным способом образования ТТГ-ассоциации является плавление базальтов океанского типа, предварительно превращенных в амфиболиты или эклогиты. Последнее может быть осуществлено тремя способами. Один из них заключается в прямом погружении базальтовой, вернее коматиит-базальтовой тяжелой коры в астеносферу, располагавшуюся в то время непосредственно под корой и еще сильно насыщенную флюидами и некогерентными элементами (Kroner, Layer, 1992). Этот процесс, получивший название «сагдукция» (от англ. Sag - прогиб), мог предпочтительно развиваться в «горячих точках» - над мантийными струями (плюмами), в свою очередь инициированными метеоритными ударами. Так могли возникать первые острова протосиала (рис. 5а).

Модель обдукции, которую в те же годы продолжал развивать южно-африканский геолог М. де Вит (De Wit, 1998), скорее отличается от предыдущей тем, что в ней первичная кора океанского типа формируется в спрединговых срединно-океанских хребтах, где интенсивно гидратируется и, будучи менее плотной, чем современная, оказывается неспособной к субдукции. Вместо этого она скупчивается на периферии хребтов, дегидратируется в основании нагромождения ее пластин, с выплавлением тоналитовой магмы на глубинах 20-100 км и последующим подъемом этой магмы и амальгамацией коровых пластин. Предполагается, что дальнейшее погружение ведет к плавлению ТТГ-пород на глубине 30-35 км

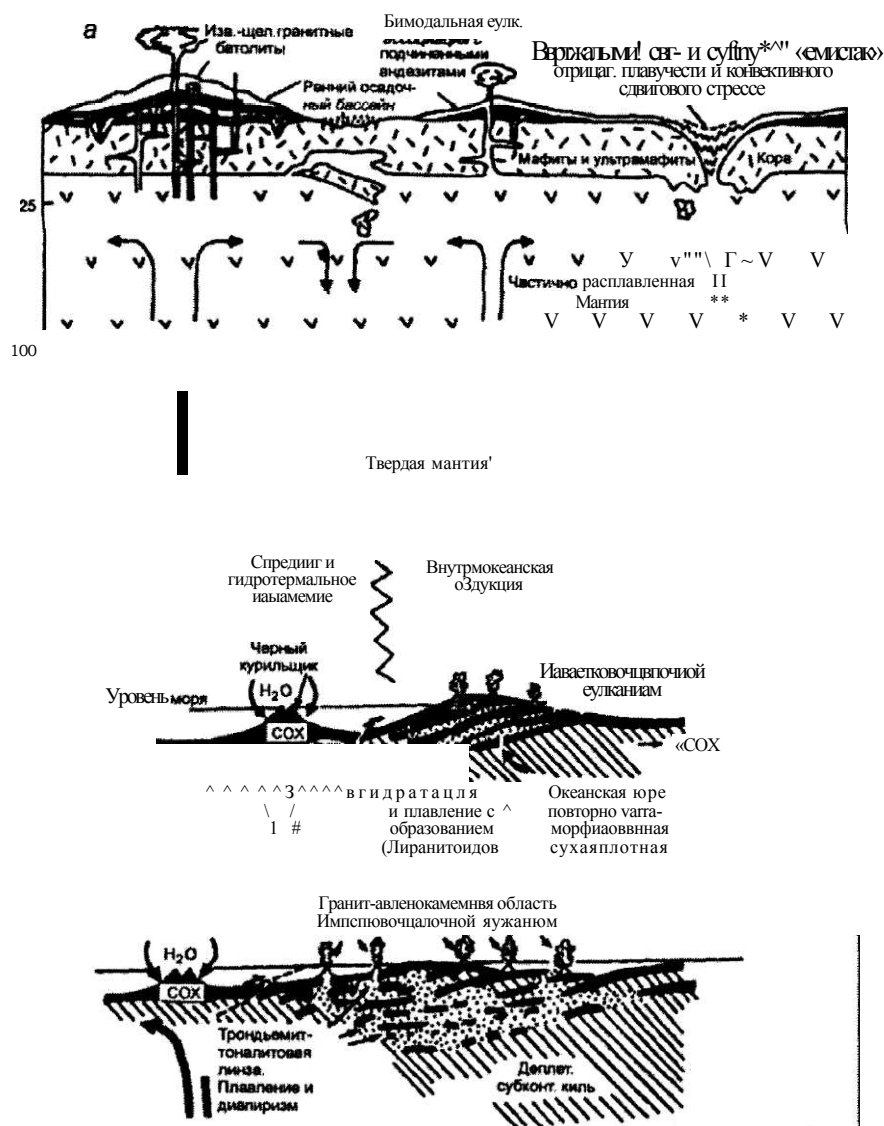


Рис. 5. Две альтернативные модели образования наиболее ранней континентальной коры

a - модель сагдукции А. Кренера, основанная на идее К. Конди; *б* - модель обдукции М. де Вига и др.

и за его счет к образованию уже «нормальных» гранитоидов и реститов в виде основных и среднего состава гранулитов (см. рис. 5).

Эта модель нашла защитника в лице В.М. Ненахова (2001). В интерпретации В.М. Ненахова, образование ТТГ-комплексов происходит следующим образом.

Первичная маломощная мафитовая кора формируется над плюмами, отодвигается в межплюмовое пространство и подвергается здесь торошению с увеличением мощности. Затем в основании призм торошения на глубине 60-80 км начинается ее селективное плавление с образованием базальт-андезит-риолитовых серий и сопряженных с ними плутонических ТТГ-комплексов (рис. 6).

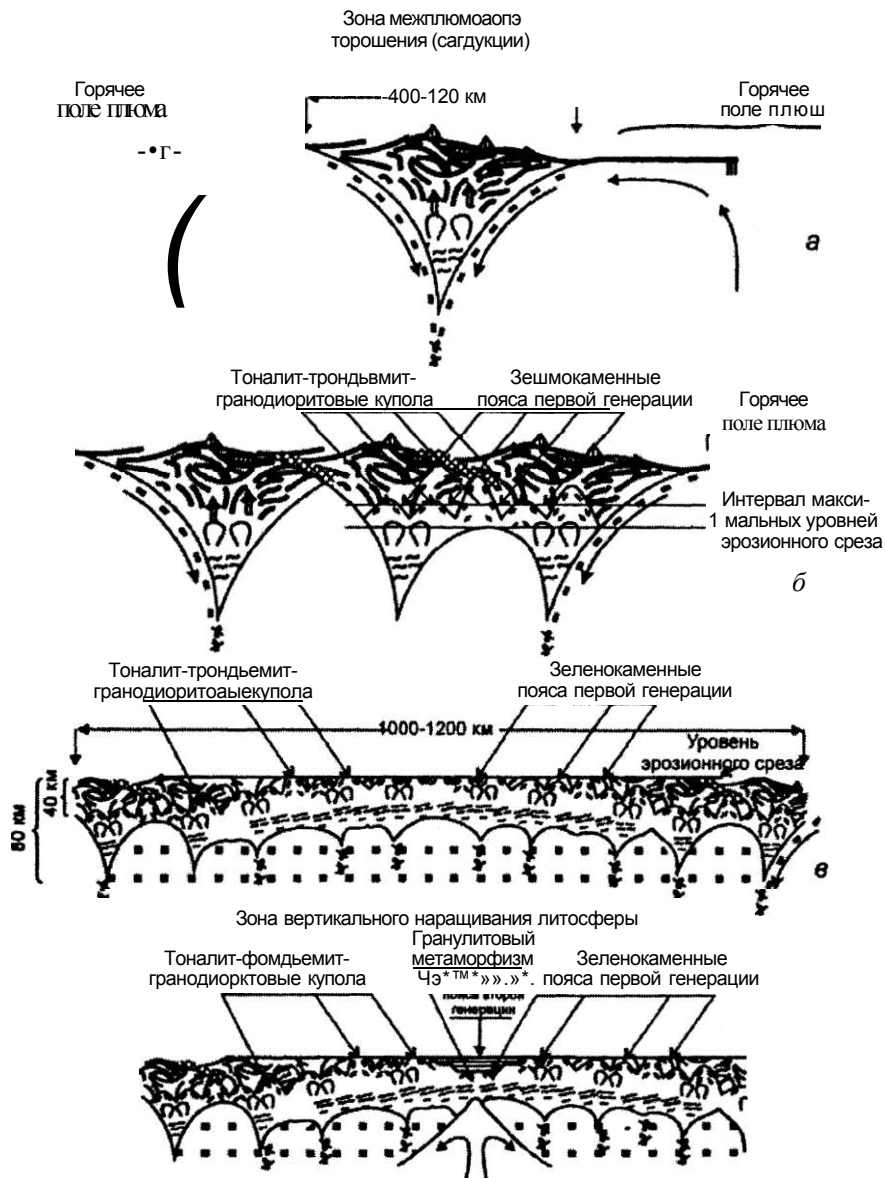
Второй способ — это собственно субдукция, с возникновением над зонами субдукции магматических дуг ТТГ-состава. Такие дуги должны были иметь, подобно более поздним дугам, линейную форму (что пока не доказано для раннеархейских ТТГ террейнов), а уже их слияние привело к образованию протоконтинентов (см. рис. 56).

Авторами третьей модели образования ТТГ-ассоциации являются южноафриканские геологи М. де Вит и его соавторы (De Wit et al., 1992), а ранее сходная модель предлагалась О.Г. Сорохтиным и С.А. Ушаковым. Это модель не сабдукции и субдукции, а обдукции. Она предусматривает серпентинизацию раннеархейской океанской коры, что делает ее неспособной к субдукции и вызывает при сжатии нагромождение чешуи этой коры, их погружение и частичное плавление с образованием пород ТТГ-ассоциации. Последняя модель получила некоторое подкрепление в исследованиях Д. Эбботт и Р. Дрюри (Abbott, Drury, 1994). Они доказывают, что 4-3,8 млрд. лет т.н. кора не могла субдуцировать вследствие своей мощности, превышавшей 23 км, а такая большая мощность была связана с высокой температурой мантии и соответственно с высокой степенью ее плавления.

Если вслед за А. Кренером (Kroner, Layer, 1992), Д. Хантером (Hunter, 1991) и другими предпочесть первый вариант, то вырисовывается картина, при которой в конце раннего архея, около 3,3 млрд. лет назад, происходит смена режима хаотической конвекции, режима мантийных струй режимом упорядоченной мелкоячеистой конвекции с обособлением множества микроплит с ядрами протосиала, сформированного до этого времени. В дальнейшем уже в течение среднего и позднего архея, в интервале 3,5-2,5 млрд. лет, за счет приращения магматических

Рис. 6. Модель возникновения и развития континентальной протокры и эволюции гранит-зеленокаменных областей (Ненахов, 2001)

а - стадия формирования межплюмовых протокры; б - стадия слияния протокры и формирования континентальных кры; в - стадия изостатического выравнивания протоконтинентов; г - стадия внутриплитного рифтогенеза, формирование зеленокаменных поясов второго типа. 1 - комагнит базальтовая кора и ее деформированные фрагменты в зонах торошения; 2, 3 - тоналит-трондьемит-гранодиоритовые купола: 2 - ранней генерации (низкокалиевые эндрбиты), 3 - поздних генераций (калиевые эндрбиты); 4 - базальтовый континентальный слой реститового происхождения; 5 - известково-щелочные магматические серии зеленокаменных поясов первого типа; 6 - фрагменты базальтовой коры, затащенные на глубину нисходящими ветвями плюмов; 7 - эклогитизированные фрагменты базальтовой протокры; 8 - площадные спрединговые зоны надплюмового пространства; 9 - зоны протосутур; 10 - пути подъема известково-щелочных магматических диапиров; 11 - направление адвективного перемещения вещества в плюмах; 12 - литосферная мантия; 13 - бимодальные магматиты зеленокаменных поясов второго типа



л>т происходит разрастание этих островов протосиала в более крупные континентальные площади и преобразование этого протосиала в зрелую континентальную юру. Таковой, очевидно, была общая направленность развития верхних оболочек

Земли на этих ранних стадиях. Рассматривая происхождение протоконтинентальной ТТГ-коры, мы принимали, что она образовалась целиком за счет коматиит-базальтовой протоокеанской коры, но следует признать, что это предположение является чрезмерно упрощенным. Дело в том, что «серые гнейсы», начиная с древнейших (3,9-3,8 млрд. лет), практически повсеместно содержат в большем или меньшем количестве и больших или меньших размеров включения метавулканитов и метаосадочных пород; из последних очень характерны железистые кварциты. Отсюда ясно, что при образовании ТТГ плавлению подвергались не только базальты и коматииты, но и эти две категории пород. Весьма вероятно, что этому способствовала их интенсивная «проработка» флюидами, поступавшими из еще богатой ими астеносферы (Коротаев, Никишин, 1983), и что процесс этот шел на данном этапе сходно с моделью гранитообразования, разработанной Д.С. Коржинским и затем В.А. Жариковым (1987). При этом «сиализация» симатической протокоры могла облегчаться тем, что существенный объем последней подвергся предварительно, в эпоху отсутствия гидросферы, интенсивному химическому выветриванию с обогащением поверхностного слоя кремнеземом и глиноземом. Предшественником этой коры выветривания должен был служить реголит, сходный с лунным. Как бы то ни было, облик нашей планеты к началу среднего архея, т.е. 3,5 млрд. лет т.н., уже существенно приблизился к современному. Она уже должна была обладать не только ядром, мантией и корой, причем двух типов - океанской и континентальной (протоконтинентальной), но и водной и воздушной оболочками. Более того, к тому времени на Земле уже зародилась органическая жизнь, возникла биосфера.

Однако наиболее популярной все же стала субдукционная модель, особенно после того, как в Алеутской островной дуге были открыты магнезиальные андезиты, получившие название адакитов (от острова Адак). Геохимические особенности этих пород привели к выводу, что они представляют продукт прямого селективного плавления слэба субдуцируемой океанской литосферы, а не мантийного клина над ней, что оказывается возможным в условиях более высокой архейской температуры в мантии и субдукции молодой, еще относительно горячей океанской литосферы (Drummond et al., 1996). В этом и видится отличие архейского надсубдукционного магматизма от фанерозойского (рис. 7). В дальнейшем породы типа адакитов были обнаружены, в частности, в юго-западной Японии, где возраст субдуцируемой коры 13-15 млн. лет (Furukawa, Tatsumi, 1999), а также в некоторых других регионах (Каскадные горы в Северной Америке, Центральная Америка, Анды). Остается, однако, фактом, что в фанерозое породы подобного типа крайне редки, как, например, и коматииты. Но происхождение адакитов с их своеобразным химическим составом за счет прямого плавления слэба получило экспериментальное подтверждение (Rapp et al., 1999).

В архее судуцируемая океанская кора была в среднем моложе и горячее, и условия давления и температуры дегидратации/плавления субдуцируемого слэба и вышележащей мантии существенно отличались.

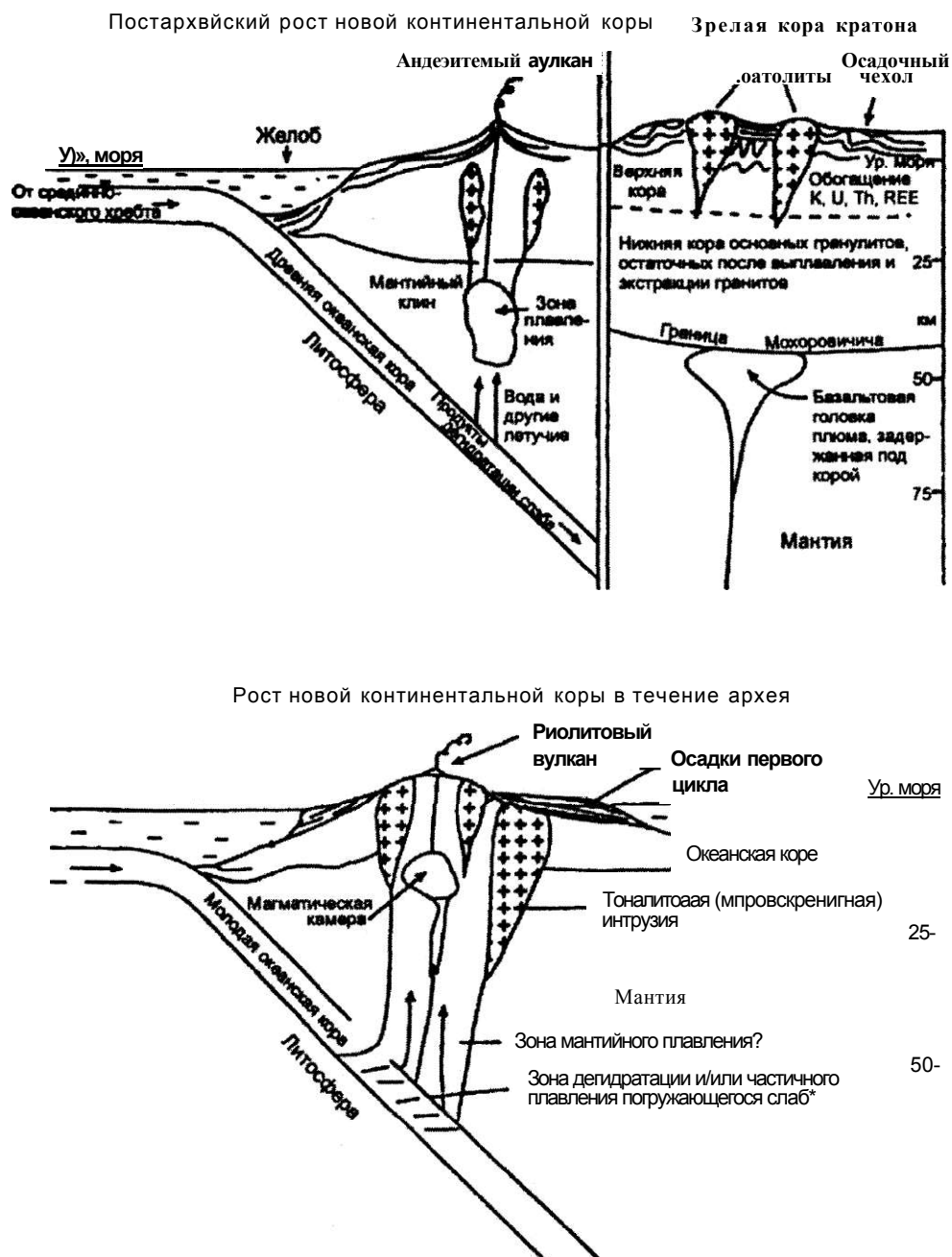


Рис. 7. Схематические модели, иллюстрирующие различия между архейским и постархвйским корообразованием в зонах субдукции (Taylor, McLennan, 1991)

Субдукционная модель и аналогия с молодыми адакитами подверглась серьезной критике со стороны австралийского ученого Р. Смитиеса (Smithies, 2000). Этот исследователь отметил существенные петрохимические различия между ТТГ-комплексами древнее 3,0 млрд. лет и адакитами, указывая, что высокое содержание Mg и низкое - SiO_2 свидетельствуют о взаимодействии продуктов плавления слэбов с вышележащей мантией, в то время как состав ТТГ следов такого взаимодействия не обнаруживает. Отсюда делается вывод, что модели, объясняющие образование ТТГ за счет плавления гидратированного базальтового материала в основании утолщенной коры предпочтительнее субдукционной модели. При этом делается ссылка на примеры из Кордильер Северной и Южной Америки и Новой Зеландии - образование Бла-гранитоидов за счет плавления мафитовой нижней коры.

Однако в более поздней работе (Defant, Kepezhinskas, 2001) указывается, что среди адакитов существуют два типа, из которых один, с наиболее высоким содержанием MgO, является продуктом субдукции молодой и горячей архейской литосферы, рожденной на многочисленных осях спрединга.

В заключение следует еще упомянуть о «гибридных» плюм- и плейт-тектонических моделях, в которых принимается, что сначала над плюмами образуется мощная океанская кора, а затем под влиянием начавшейся субдукции ее низы плавятся с формированием пород ТТГ-состава (см., например, Albarede, 1998).

1.4. ТЕКТНИКА ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

В настоящее время считается общепризнанным, что основу динамики Земли составляет тепло, выделяющееся в ее недрах, что наша планета - тепловая машина и что тепло вызывает конвекцию во внешнем ядре и мантии Земли, ответственную за вертикальные и горизонтальные перемещения ее верхней твердой оболочки - литосферы. Такие перемещения достаточно удовлетворительно описываются концепцией, получившей название «тектоника литосферных плит» (или просто «тектоника плит») и завоевавшей почти всеобщее признание.

Напомним, что, согласно данной концепции, литосфера представляет собой верхнюю твердую и относительно жесткую и хрупкую оболочку Земли, включающую кору и самую верхнюю часть мантии. Литосфера разделена на небольшое число крупных и средних по размерам плит, которые перемещаются друг относительно друга в горизонтальном направлении. Эти перемещения бывают трех рода: раздвиг, подцвиг одних плит под другие, сдвиг.

Раздвиг осуществляется в рифтовых зонах срединно-океанских хребтов; это так называемые оси спрединга, или дивергентные границы плит. Подцвиг происходит вдоль осей глубоководных желобов, сопровождающих вулканические островные дуги или края континентов, надстроенные вулкано-плутоническими поя-

сами; это конвергентные границы плит. Третий тип перемещения осуществляется тем скольжением плит друг относительно друга по вертикальным поверхностям в латеральном направлении; это трансформные границы плит.

Отодвигающиеся от осей спрединга плиты затем испытывают погружение в более глубокую мантию - субдукцию по наклонным поверхностям, падающим под вулканические дуги или континенты. Эти поверхности являются одновременно сейсмофокальными, ибо вдоль них происходит основная масса землетрясений, в том числе все глубокие. Оси спрединга также сейсмичны, но их характеризует неглубокая и слабая сейсмичность.

Рифтовые зоны срединно-океанских хребтов, расширяющиеся в процессе спрединга, заполняются новообразованной корой океанского типа, наращивая раздвигающиеся литосферные плиты. В зонах субдукции, напротив, происходит их деструкция за счет переплавления погружающейся океанской коры и литосферы в целом, но продукты этого плавления - магма и флюиды, взаимодействуя с литосферой нависающей плиты, продуцируют магму известково-щелочного состава, создающую вулканические островные дуги и краевые вулкано-плутонические пояса континентов. Этот вулканизм составляет основную и наиболее впечатляющую часть земного вулканизма.

Оси спрединга тоже представляют собой вулканические зоны, но они питаются толеит-базальтовой магмой неглубокого происхождения, их вулканизм носит в основном подводный и более спокойный характер, проявляясь вдоль огромного числа мелких центров. Однако суммарно он также имеет важнейшее значение, создавая океанскую кору.

Литосферные плиты на всем своем пути от осей спрединга к зонам субдукции оказываются расколотыми в поперечном направлении трансформными разломами, вдоль которых и происходит латеральное перемещение ограниченных ими сегментов плит и благодаря которым оси спрединга расчленены на смещенные относительно друг друга в плане отрезки. На участках между этими сегментами срединных хребтов трансформные разломы сейсмичны; вдоль них располагаются и отдельные центры вулканических извержений.

Непосредственно под литосферой располагается частично расплавленная, вернее подплавленная (на несколько процентов), и поэтому менее вязкая, относительно пластичная оболочка Земли - астеносфера. Под осями спрединга в ней локализуются восходящие течения. Они-то и вызывают образование срединно-океанских хребтов с их рифтовыми зонами и вулканизмом, под зонами субдукции - нисходящие течения, а в промежутке - горизонтальные ветви конвективных желей (рис. 8), которые и увлекают плиты, обуславливая их перемещение от осей спрединга к зонам субдукции.

Дополнительными силами, вызывающими перемещение плит, являются силы расталкивания в зонах спрединга, а также гравитационное расползание от осей спрединга и особенно затягивание в зоны субдукции вследствие утяжеления на пути к ним при остывании и перехода базальта в эклогит при погружении (экло-

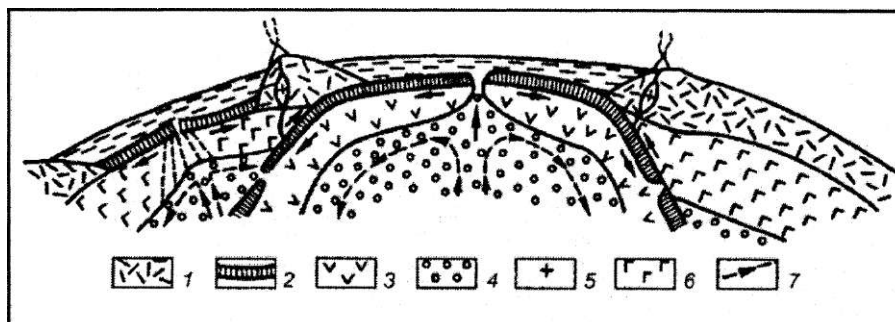


Рис. 8. Общая схема тектоники плит

1 - континентальная кора; 2 - океанская кора; 3 - литосферная мантия океанов; 4 - астеносфера; 5 - граниты; 6 - литосферная мантия континентов; 7 - конвективные течения в мантии и направление смещения плит

гит значительно плотнее и тяжелее не только базальта, но и мантийного перидотита).

Такова общая схема тектоники плит, в главных чертах впервые намеченная в 1967-1968 гг. и с тех пор в основных своих, изложенных выше, положениях получившая полное подтверждение.

Современная картина перемещения литосферных плит, их современная кинематика, впервые выявленная Кс. Ле Пишоном в 1968 г., затем уточненная Дж. Минстером и Т. Джорданом, а также независимо С.А. Ушаковым и, наконец, в модели NUVEL-1A в последние годы, ныне убедительно подтверждены и космогеодезическими исследованиями, особенно методом JPS.

Не менее убедительно восстановлена картина перемещения плит за последние 160 млн. лет благодаря картированию систем линейных магнитных аномалий океанского ложа и глубоководному бурению. На континентах расшифровке палеокинематики плит способствовало установление идентичности офиолитовых комплексов складчатых систем и океанской коры (выяснилось, однако, что эта кора может принадлежать, как собственно океанам, так и их окраинным морям). В качестве других маркеров взаимодействия плит с успехом используются вулканические дуги, вулканоплутонические пояса, парные метаморфические пояса, в частности метаморфиты низкой температуры и высокого давления. Все они приурочены к древним зонам субдукции, в то время как офиолиты - к зонам спрединга. Таким образом, выясняется, что современная тектоника плит «работает» уже, по крайней мере, 160 млн. лет, т.е. со средней юры, и примерно в том же ритме.

Что же касается более ранних геологических эпох, то, начиная с позднего протерозоя, с 1-0,85 млрд. лет т.н., мы обнаруживаем в геологической летописи континентов полный набор характерных признаков тектоники плит - офиолиты, вулканические дуги, вулканоплутонические пояса, глаукофановые сланцы (метаморфиты низкой температуры и высокого давления) - убедительно свидетель-

ствующие о действии того же плитно-тектонического механизма на протяжении этого интервала геологического времени. Правда, восстановление кинематики плит для данного интервала уже невозможно с той точностью, которая достигнута для последних 160 млн. лет, поскольку линейные магнитные аномалии более древнего возраста, как правило, не сохранились. Поэтому ведущим методом таких реконструкций становится палеомагнитный метод с привлечением данных палеоклиматологии и палеобиогеографии (Л.П. Зоненшайн, М.И. Кузмин). Тем не менее, с применимостью тектоники плит к палеозою и позднему протерозою согласны, пожалуй, все геологи, геофизики и геохимики. Несколько иное отношение к еще более ранним геологическим временам, хотя определенные и даже весьма ощутимые сдвиги в этом смысле в мировоззрении специалистов произошли в последние годы.

Как ни странно, но наименее достоверной информацией мы располагаем по среднепротерозойскому этапу (1,65-1,0 млрд. лет т.н.), непосредственно предшествующему только что рассмотренному позднепротерозойско-фанерозойскому интервалу. Для этого этапа имеются лишь отдельные указания на присутствие офиолитов на крайнем юге и в Центральной части Африки, в Юго-Восточном Китае, на Урале; вулcano-плутонических поясов - в Скандинавии и Прибайкалье; глаукофановых сланцев - в Юго-Восточном Китае. Возможно, это связано с тем, что в среднем протерозое или, по крайней мере, в течение значительной части зона основная масса континентальной коры слагала один или небольшое число суперконтинентов, и соответственно число океанских бассейнов с их осями спрединга и окаймленных зонами субдукции также было ограниченным. Однако убедительным свидетельством проявления субдукции в среднем протерозое служит развитие мощных вулcano-плутонических поясов окраинно-континентального типа - к Транскандинавскому и Атитканскому следует добавить мощные пояса подобного типа на юге северной и западной Америки. Вполне возможно, что все они составляли лишь звенья надсубдукционного обрамления суперконтинентов, существовавших на протяжении среднего протерозоя.

Гораздо более определенными данными мы располагаем теперь в отношении раннего протерозоя (2,5-1,65 млрд. лет т.н.), особенно его второй половины, начиная с 2-1,9 млрд. лет т.н. Известные для этого времени складчатые системы и породившие их морские бассейны обнаруживают разительное сходство в своем строении и развитии с позднепротерозойско-фанерозойскими. В ряде складчатых систем: на Канадском щите - Трансгудзонской, на Балтийском щите - Свекофеннской, в Индии - Аравалли-Делийской и Северо-Сингбумской - установлены достаточно типичные офиолиты; в некоторых предполагается их присутствие. Начинают обнаруживаться и глаукофановые сланцы, например, в Китае. В других случаях роль метаморфитов высокого давления может принадлежать более высокотемпературным образованиям - эклогитам. Известны вулканические дуги и вулcano-плутонические пояса с крупными батолитами гранитоидов, в частности, в системах Уопмей, Трансгудзонской и Лабрадор на Канадском щите, в Све-

кофеннской на Балтийском и др. Вместе с тем, в некоторых раннепротерозойских складчатых системах офиолитов не обнаружено, и имеющиеся признаки указывают на их энсиалическое заложение. Это относится, в первую очередь, к Австралии и Африке. Однако отсутствие офиолитов на поверхности еще не означает, что в этих системах в начале их развития не было новообразования океанской коры - она могла быть полностью поглощена в зонах субдукции или скрыта под надвинутыми пластинами шарьяжей. В противном случае остается предположить, что при заложении этих подвижных систем дело ограничилось утонением и переработкой сиалической коры, возможно с рассеянным спредингом, т.е. возникла кора переходного, субокеанского типа.

В общем, имеющихся данных уже вполне достаточно, чтобы утверждать, что тектоника плит действовала и в раннем протерозое, но с некоторыми отличиями от позднепротерозойско-фанерозойской. Они состояли, прежде всего, в малом размере плит и соответственно в их большем числе и большей длине осей спрединга (Никишин, Хаин, 1991). Вероятна также более ограниченная ширина океанских и тем более субокеанских бассейнов, что затрудняет ее установление палеомагнитным методом. Словом, это была «тектоника малых плит», по выражению канадского геолога А.М. Гудвина (Goodwin, 1991). При этом контуры этих плит и разделявших их осей спрединга образовывали характерную полигональную, близкую к гексагональной решетку, свидетельствующую о проявлении в подлитосферной мантии, т.е. прежде всего в астеносфере, мелкочаистой конвекции типа Рэлея-Бенара. Такая решетка наиболее отчетливо выражена в Австралии и Африке (рис. 9).

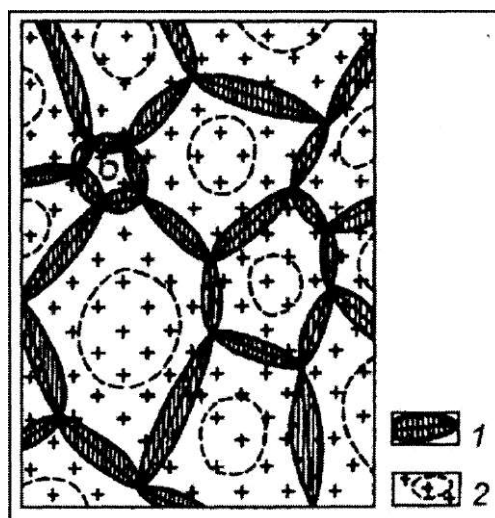


Рис. 9. Принципиальная схема соотношения гранулитовых поясов с гранит-зеленокаменными областями

1 - гранулитовые (гранулит-гнейсовые) пояса; 2 - гранит-зеленокаменные области

Еще большую специфику тектонической структуры и развития обнаруживает архей. Ведущими структурами среднего и позднего архея являются так называемые зеленокаменные пояса. В меньшем количестве и в несколько менее типичном виде они существовали и в раннем протерозое в Западной Африке, на севере Южной Америки, в осевой зоне Трансгудзонской системы Канады. Многие исследователи указывают на большое сходство нижней части разрезов зеленокаменных поясов, сложенных толеитовыми базальтами и высокомагнезиальными базитами и ультрабазитами-коматиитами, с силлами и дайками тех же пород и более поздних офиолитов, и иногда применяют последний термин к этим образованиям. Но, видимо, все же более правы те геологи, которые воздерживаются от этого или пользуются более осторожным названием «протоофиолиты». Однако в последние годы в Карелии (Щипанский и др., 2001) и в северозападном Китае (Kusky et al., 2001) были обнаружены типичные позднеархейские офиолиты. Что касается вулканитов, слагающих среднюю и верхнюю части разреза выполнения зеленокаменных поясов, то в очень многих из поясов они вполне сходны с известково-щелочными сериями молодых вулканических дуг. Заканчивают свое развитие зеленокаменные пояса в условиях интенсивного сжатия, часто приводящего к образованию сложной складчато-надвиговой структуры, опять-таки напоминающей структуру молодых подвижных поясов.

Учитывая все эти особенности, большинство современных исследователей склоняются к тому, что плитно-тектоническая модель развития вполне применима и к раннедокембрийским зеленокаменным поясам. Отсюда появление основанных на этой модели реконструкций для многих щитов древних платформ - Канадского, Балтийского, Каапвальского (Южная Африка) и других. Вместе с тем следует отметить, что для ряда зеленокаменных поясов существуют очевидные признаки их заложения на коре континентального (протоконтинентального) типа - стратиграфическое налегание, базальные конгломераты, кварцевые или аркозовые песчаники в низах разреза с более древними обломочными цирконами. Это касается Канады, Южной Африки, Австралии, Индии и свидетельствует о том, что если зеленокаменные пояса и начинали развиваться на коре океанского типа, то эта кора была новообразованной и процесс начинался с континентального рифтогенеза.

Приходится признать далее, что не во всех зеленокаменных поясах вулканизм средней и поздней стадий развития отвечает островодужному. В ряде поясов вулканы среднего состава отсутствуют, и вулканизм приобретает бимодальный характер, более свойственный континентальным рифтам. По мнению А. Крёнера (Kroner, 1991), основанному на примерах Южной Африки (пояс Барбертон) и Западной Австралии (блок Пилбара), такой характер был типичен для среднеархейских зеленокаменных поясов, в то время как позднеархейские развивались уже по плитно-тектоническому сценарию. Если эта точка зрения справедлива, то надо признать, что развитие литосферы по плитно-тектоническому пути пошло, начиная с позднего архея, т.е. примерно с 3 млрд. лет назад. Но число примеров,

использованных А. Крёнером, слишком невелико; другие же среднеархейские пояса не вполне подтверждают его вывод.

Так или иначе, можно считать, что тектоника плит заработала на Земле не позднее 3,5-3 млрд. лет т.н. Но архейская тектоника плит отличалась от фанерозойской еще больше, чем раннепротерозойская (Новикова и др., 1991; Abbott, Hoffman, 1984). Размер плит был еще меньшим, число их еще большим, как и длина осей спрединга, но сам спрединг и предшествующий ему рифтинг могли протекать в существенно иной форме, чем в более молодые эпохи - рифтинг мог быть пластичным, а спрединг проявляться в ограниченных масштабах и часто в диффузной форме. Мощная и тяжелая вследствие участия коматиитов кора должна была быстро подвергаться субдукции и быстрому плавлению в горячей мантии, что способствовало образованию ТТГ-гранитоидов. Соответственно, бассейны зеленокаменных поясов должны были быть относительно короткоживущими. Такую тектонику плит можно назвать мультиплитной, или эмбриональной.

До 3,5 млрд. лет т.н. Земля переживала доплитно-тектонический этап своего развития. Конкретно об условиях данного этапа мы можем пока только догадываться. В какой-то мере этому способствует сравнение с Венерой, развитие которой, видимо, остановилось на этой стадии. Ее геодинамика определяется прежде всего мантийными струями (плюмами), которые на плитно-тектоническом этапе развития Земли являлись важным элементом внутриплитной тектоники, но второстепенным в глобальном аспекте. Другим таким элементом служат внутриконтинентальные рифты, которые, как отмечалось выше, возможно, играли доминирующую роль в тектонике среднего архея. Эти структуры растяжения могли осложнять поднятия, создаваемые мантийными струями, в то время как на периферии таких поднятий возникали структуры сжатия - желоба и складчатые системы, что и наблюдается в современной структуре Венеры. На еще более ранней стадии, между 3,9 и 4,2 млрд. лет т.н., весьма существенную роль в развитии верхних оболочек Земли играла интенсивная метеоритная бомбардировка, которая и могла определять локализацию мантийных струй, пробивая первичную, вероятно, в основном базальтовую кору. Эта кора, как уже говорилось, начала формироваться как продукт остывания и кристаллизации магматического океана, существовавшего на Земле в первые сотни миллионов лет ее истории.

Таким образом, развитие верхних оболочек Земли шло на доплитно-тектонической стадии от магматического океана через метеоритные кратеры, горячие точки, континентальные рифты, а на плитно-тектонической - от эмбриональной мультиплитной тектоники позднего архея, через тектонику малых плит раннего протерозоя к полномасштабной тектонике плит позднего протерозоя-фанерозоя. По другим представлениям, эта кора вследствие серпентинизации или большой мощности была, напротив, не способна к субдукции и испытывала противоположный процесс - обдукцию, с нагромождением более молодых ее пластин на более древние. Особый интерес в этой эволюции вызывает переход от преобладания плюм-тектоники к преобладанию плейт-тектоники, совершившийся на Земле

где-то к середине архея, а на Венере, вероятно, 0,5 млрд. лет назад (именно этот возраст, по новейшим данным, имеет наблюдаемая ныне структура поверхности Венеры). Можно предположить, что этот переход был связан с охлаждением литосферы и появлением в ней устойчивой сети регматических трещин, которые определили контуры будущих плит и вдоль которых стали растекаться мантийные, астеносферные потоки, ранее сфокусированные в узлах этой регматической сети.

Так могла возникнуть вместо «точечной» адвекции система мелкочаистой конвекции, характерной для раннего докембрия, начиная с середины (условно) архея. Тезис о появлении тектоники плит уже в архее получил недавно всестороннее обоснование в объединенной работе (Cawood et al., 2006). Так или иначе, позднеархейская тектоника плит была полностью идентична более поздней, хотя бы даже раннепротерозойской. Во-первых, сколько-нибудь крупные плиты отсутствовали; наблюдалось нечто похожее на современную обстановку запада Тихого океана - чередование вулканических дуг и узких бассейнов с океанской корой - зеленокаменных поясов.

Поэтому справедливо наименование таких плит миниплитами (Минц, 1998), а самой тектоники - мультиплитной. Во-вторых, все более популярным становится представление о том, что вследствие более высокой температуры мантии ее плавление было более энергичным и мощность выплавленной коры более значительной, что делало ее сопоставимой с более молодыми океанскими плато. Аккреция последних и приводила к становлению гранит-зеленокаменных областей (рис. 10).

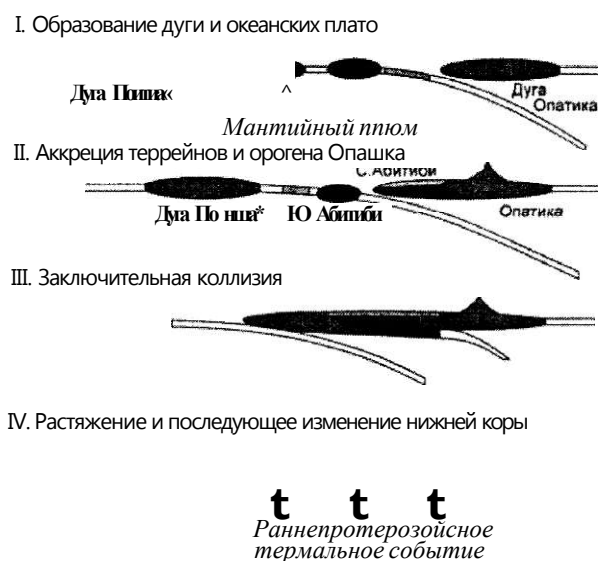


Рис. 10. Первичные процессы образования коры над наклоненной к северу зоной субдукции, обнаруженной сейсмическим профилем через плутонический пояс Опатика (Calvert, Ludden, 1999)

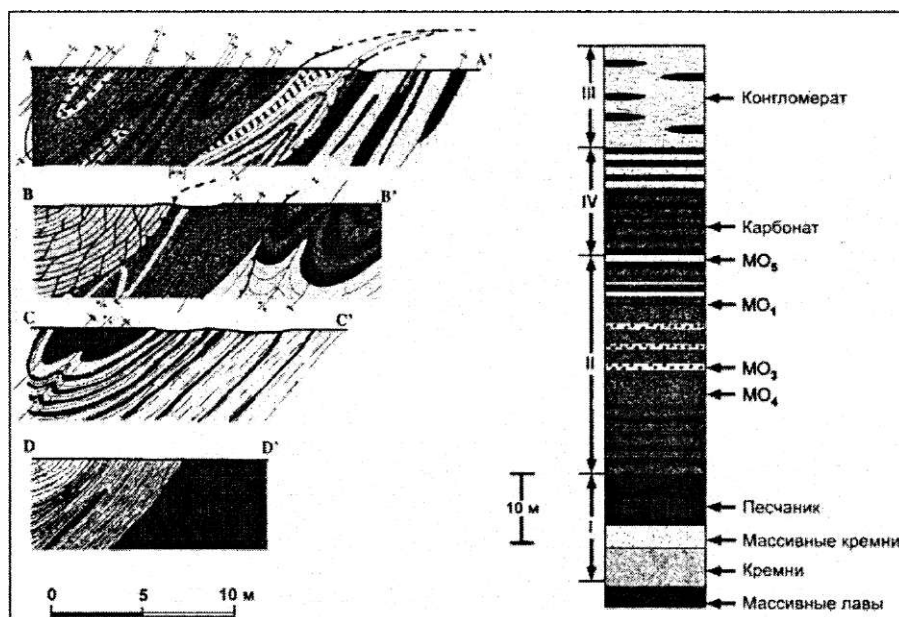


Рис. 11. Схематический меридиональный профиль кремнисто-турбидидной единицы и реконструированная литостратиграфия (Komiya et al., 1999)

Между тем, группа японских исследователей, относительно недавно очень детально изучившая известный раннеархейский комплекс юго-западной Гренландии, выделила здесь аналоги офиолитового комплекса и аккреционной призм, в которой они принимают участие (Komiya et al., 1999). Это позволило им разработать плитно-тектоническую модель эволюции региона (рис. 11).

Другие исследователи (Nutman et al., 2001) иначе интерпретируют структуру этого комплекса, полагая, что он состоит из находящихся в тектоническом контакте пластин отложений, первоначально не составлявших единую последовательность. Однако и эти исследователи считают данную структуру продуктом плитно-тектонических процессов, но не субдукции, а коллизии.

Итак, зародившись в архее, тектоника плит эволюционировала на протяжении раннего и среднего протерозоя, пока уже в начале или даже к началу позднего протерозоя не приобрела свой современный стиль проявления.

1.5. ПРОЯВЛЕНИЯ ЦИКЛИЧНОСТИ В ВЕЛИКИХ ОЛЕДЕНЕНИЯХ

Существование покровного оледенения в полярных областях Земли является одной из примечательных особенностей нашей планеты, выделяющих ее среди

других планет земной группы. Только на Марсе наблюдается нечто подобное, но очень специфическое и меньшее по своим масштабам.

Уже более 100 лет назад было установлено, что современное покровное оледенение Антарктиды и Гренландии - лишь реликт гораздо более обширного оледенения, охватывавшего нашу планету всего 18-10 тыс. лет назад; следовательно, мы живем в межледниковую эпоху. Это касается, прежде всего, северного полушария - Северной Америки и Северной Евразии. Во время максимума этого оледенения льды покрывали треть суши и достигали многокилометровой толщины. Помимо основных, приполярных областей, крупные ледники охватывали почти все горные системы мира, включая Альпы, Кавказ, Тянь-Шань, Тибет, Гималаи, Анды. Поскольку из океана была изъята значительная масса воды, его уровень снизился более чем на 100 м, а это не могло не отразиться на характере осадконакопления в шельфовых областях и на рельефе суши. Средняя температура у поверхности Земли упала на 5°С, что существенно повлияло на животный и растительный мир. Таким образом, глобального масштаба оледенение стало событием первостепенного значения в геологической истории.

Сначала было распространено мнение, что этот последний и, как выяснилось, не единственный ледниковый период укладывался в рамки четвертичного периода, длительность которого ныне определена в 1,6 млн. лет. Считалось даже, что это покровное оледенение - характерный признак именно четвертичного периода, который в связи с появлением человека был назван А.П. Павловым антропогеном. Но и род Номо появился на 1,5 млн. лет раньше, и продолжительность последнего ледникового периода оказалась намного больше первоначально предполагавшейся. Установить это удалось благодаря обнаружению в керне скважин глубоководного океанского бурения, пробуренных в высоких и умеренных широтах, типичных продуктов ледового разноса.

Таким образом, было определено, что оледенение в северном полушарии началось уже в позднем миоцене, около 10 млн. лет назад, а оледенение Антарктиды - еще гораздо раньше, в олигоцене, около 30 млн. лет т.н., если не во второй половине эоцена, около 40 млн. лет т.н. Следовательно, последнее в истории Земли оледенение имело огромную продолжительность, сравнимую с продолжительностью целого геологического периода. Как мы увидим ниже, то же относится и к древним оледенениям.

Довольно скоро после открытия последнего ледникового периода выяснилось, что история развития этого оледенения была достаточно сложной: она состояла из чередования эпох наступания и отступания ледников, т.е. ледниковых и межледниковых эпох. Как уже отмечалось, мы живем не в послеледниковую, а в межледниковую эпоху. В четвертичном периоде в Северной Америке и в Северной Евразии ледниковых эпох насчитывается пять. В настоящее время известно, что они наступали примерно каждые 100 тыс. лет (значение этой цифры будет показано ниже).

Выявленная периодичность наступания и отступления ледников нуждалась в объяснении, и такое объяснение было предложено уже в первой половине XX в. сербским ученым М. Миланковичем. Выдвинутая им гипотеза связывала изменения климата Земли, являющиеся причиной чередования ледниковых и межледниковых эпох, с изменениями солнечной инсоляции. Если принять, что солнечное излучение для этого интервала времени - величина постоянная, а это подтверждено ныне наблюдениями с искусственных спутников Земли, то интенсивность солнечной инсоляции оказывается зависимой от трех основных параметров, определяющих «поведение» Земли на околосолнечной орбите.

Первый из этих параметров - наклон земной оси по отношению к плоскости ее орбиты - чем он больше, тем больше амплитуда сезонных колебаний: зима становится более холодной, лето - более жарким. Вторым параметром - так называемая прецессия, выражающаяся в том, что земная ось описывает окружность по отношению к направлению на удаленные и поэтому кажущиеся неподвижными звезды. Изменение прецессии влияет на инсоляцию косвенно, через третий параметр - эксцентриситет земной орбиты, т.е. величину ее отклонения от окружности, ее эллипсовидность. Двигаясь по своей Орбите, Земля то несколько удаляется от Солнца, то приближается к нему; крайнее приближение называется перигелием. Влияние изменений эксцентриситета на инсоляцию состоит в том, что его увеличение усиливает эффект прецессии. Последний же определяет время прохождения Землей перигелия, когда контрасты зимних и летних температур сглаживаются в одном полушарии и возрастают в другом.

Изменения всех трех параметров вращения Земли обусловлены притяжением Луны и других планет и носят периодический характер. Наклон земной оси изменяется с периодом в 40 тыс. лет, прецессия совершает полный круг за 20 тыс. лет, а цикл колебаний эксцентриситета - 100 тыс. лет. Все эти изменения сказываются на инсоляции, но даже их суммарное воздействие очень невелико. Эксцентриситет вызывает лишь небольшие изменения глобальной инсоляции, а наклон оси и прецессия влияют не на суммарную инсоляцию, а лишь на ее распределение по широтам и сезонам. И, тем не менее, последнее обстоятельство имеет, как впервые выяснил М. Миланкович, решающее значение для возникновения оледенения. а именно: инсоляция высоких широт северного полушария в летний период. Дело в том, что «наиболее существенно не то, сколько снега накопится зимой, а то, сколько его сможет сохраниться и не растаять в течение лета. Если высокие широты в летнее время будут получать меньше солнечной энергии, то снег с большей вероятностью сохранится до новой зимы. И если подобные условия продлятся много лет, то по мере уплотнения под собственной тяжестью снег будет превращаться в лед, формируя ледниковые покровы, и на Земле наступит ледниковая эпоха. С другой стороны, при возрастании летней инсоляции, льда успеет растаять больше, чем могут возместить зимние снегопады, и на Земле установится климат, близкий к современному» (Кови, 1984, с.31) (рис. 12).

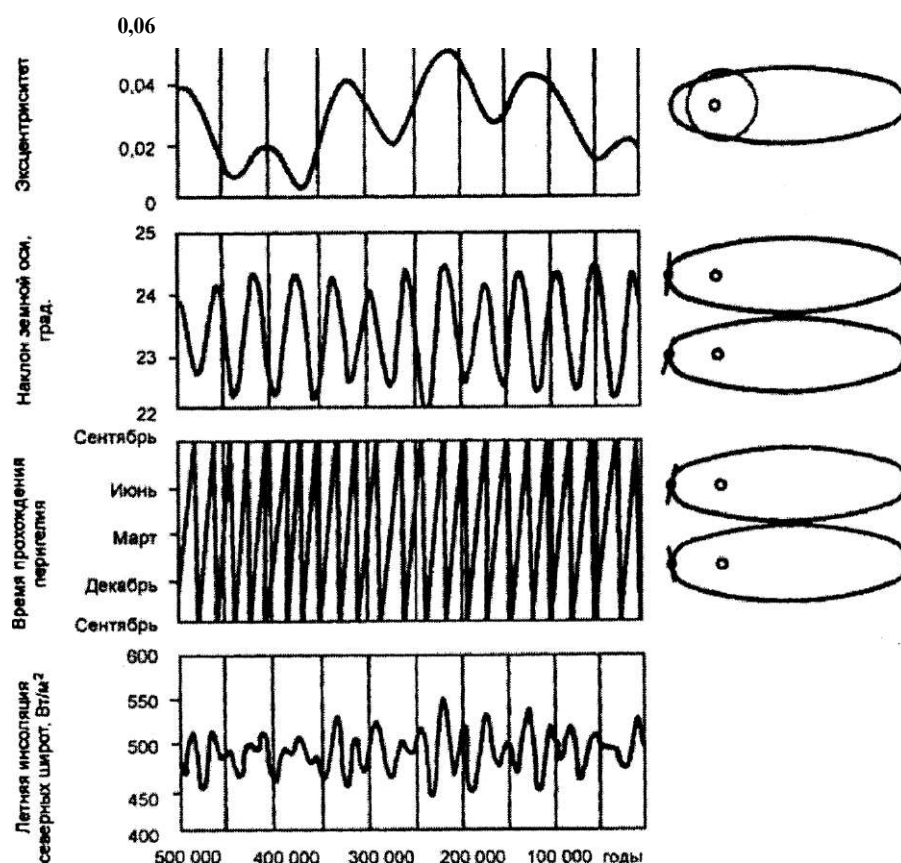


Рис. 12. Теория сербского астронома М. Миланковича

Связывает наступление ледниковых эпох с изменениями трех параметров орбиты: эксцентриситета (степени отклонения орбиты от круговой), наклона земной оси (угла между осью и перпендикуляром к плоскости орбиты) и времени прохождения перигелия (момента наибольшего сближения Земли с Солнцем).

Каждый из этих параметров медленно изменяется под влиянием притяжения Луны и других планет. Хотя глобальная годовая инсоляция меняется при этом мало, относительно сильные колебания испытывает летняя инсоляция высоких широт. Эксцентриситет, наклон оси и время прохождения перигелия рассчитаны по методу А. Берже. Эксцентриситет достигает максимальных значений приблизительно каждые 100 тыс. лет, но в его вариациях выделяется также период около 400 тыс. лет. Циклы колебаний наклона оси и времени прохождения перигелия имеют продолжительность соответственно 40 тыс. и 20 тыс. лет. Кривая изменения времени прохождения перигелия не просто синусоида, в ней выделяются два цикла продолжительностью 19 тыс. и 23 тыс. лет. Показанные изменения июльской инсоляции относятся к полосе северных широт между 60 и 70°. Расчет инсоляции производился по программе для ЭВМ, разработанной Т. Ледли из Массачусетского технологического института и С. Томпсоном из Национального научно-исследовательского центра по шучению атмосферы (по Кови, 1984)

Гипотеза М. Миланковича долго казалась довольно маловероятной, пока в 1947 г. неожиданно не получила блестящее подтверждение. Произошло это в результате изотопного анализа океанских осадков, проведенного американскими учеными Дж. Хейсом и Д. Имбри и английским ученым Н. Шелтоном. К тому времени было установлено, что изменения объема льдов на Земле находят свое отражение в изменениях отношения тяжелого изотопа кислорода ^{18}O к более легкому и шире распространенному изотопу ^{16}O . При испарении морской воды более тяжелые молекулы кислорода остаются в воде, более легкие уходят с дождем и снегом. Соответственно во время оледенения отношение ^{18}O к ^{16}O в морской воде возрастает, а в межледниковые эпохи убывает, и, чем больше это отношение, тем больше был объем материковых льдов. Содержание ^{18}O в морской воде можно определить, изучая изотопный состав кислорода в кальците раковин морских организмов.

Указанная выше группа исследователей не только установила колебания содержания ^{18}O в океанских осадках, но и сопоставила кривую этих колебаний с изменениями параметров земной орбиты, предсказанными гипотезой М. Миланковича, с использованием метода Фурье, обычно применяемого для выявления периодических колебаний и определения их частот. Результаты оказались вполне положительными, причем выяснилось, что из трех периодичностей главную роль играет цикл изменения эксцентриситета длительностью 100 тыс. лет, а изменения наклона земной оси с периодичностью в 40 тыс. лет и прецессия с периодичностью в 20 тыс. лет дают на кривых пики меньшей амплитуды.

Эти выводы получили дополнительное подтверждение в математических моделях, которые показали, что вариации орбиты действительно могли вызвать климатические изменения с периодичностью в 100 тыс. лет, а небольшое уменьшение инсоляции привести к обширному оледенению. Тем самым гипотеза М. Миланковича, ранее весьма скептически воспринимавшаяся большинством специалистов, теперь перешла в разряд теорий, дав, в общем, удовлетворительное объяснение феномену чередования ледниковых и межледниковых эпох в течение последнего ледникового периода. Оставалось, однако, некоторое недоумение по поводу того, что на первое место среди параметров орбиты выступило именно изменение эксцентриситета, в то время как расчеты М. Миланковича показывали, что колебания наклона земной оси и прецессия должны были иметь большое значение. Для объяснения этого парадокса американский ученый К. Кови выдвинул идею, согласно которой здесь вступает в действие дополнительный фактор - колебания в положении подледникового ложа под нагрузкой льда или вследствие его таяния, которые также могут иметь период в 100 тыс. лет и находиться в резонансе с изменениями эксцентриситета, усиливая их влияние.

Гораздо более важное, кардинальное значение имеет другое обстоятельство: теория М. Миланковича объясняет факт чередования ледниковых и межледниковых эпох, но недостаточна для объяснения самого наступления ледникового периода, чередования в истории Земли периодов холодного и теплого климата,

продолжительностью первых в десятки миллионов, вторых даже в сотни миллионов лет. Ведь наступлению последнего ледникового периода предшествовало господство теплого и более равномерного климата на протяжении 200 млн. лет; похолодание началось лишь в палеоцене. Поскольку нет оснований предполагать сколько-нибудь существенное изменение солнечного излучения за этот период времени или более резкие колебания параметров земной орбиты, следует обратиться к другим, более земным факторам. В деталях же речь идет о том, что ложе ледника должно опускаться под тяжестью накапливающихся льдов, но одновременно происходит подъем поверхности ледника, сопровождающийся усиленным накоплением снега и его ростом. Однако дальнейшее прогибание ложа ведет к опусканию поверхности ледника и к его таянию, т.е. к уменьшению толщины. В итоге ложе ледника снова поднимается, а за ним и поверхность ледника, что приводит к повторению цикла, в первую очередь к перемещению литосферных плит и связанному с ним изменению в расположении континентов, прежде всего относительно полюсов, их рельефа, и в конфигурации разделявших их океанов. Так, хорошо известно, что формированию ледникового щита Антарктиды способствовало не только ее положение в Южной полярной области Земли, которое она заняла уже много раньше, но и образование сплошного водного пространства вокруг нее в связи с отделением сначала Африки и Индии, затем Австралии и, наконец, Южной Америки, повлекшим за собой возникновение циркум-антарктического холодного течения, изолировавшего Антарктиду от теплых тропических вод. Нечто подобное произошло позднее и в северном полушарии - раскрытие Арктического океана с его холодными водами и с изоляцией Северной Америки и Евразии, а также отделившейся от них Гренландии. Отнюдь не случайно начало оледенения Антарктиды совпало с началом на Земле альпийского горообразования, а начало оледенения Арктики - с одним из наиболее крупных его пароксизмов.

Для проверки этих предположений обратимся к более ранним ледниковым периодам в истории Земли (Harland, Herod, 1975). Уже в середине XIX в. в Индии были открыты следы позднепалеозойского покровного оледенения, позже обнаруженные в Африке, Южной Америке, Австралии и, наконец, уже в XX в., в Антарктиде и на юге Аравийского полуострова. Наиболее явными признаками этого оледенения явились исштрихованное ложе, экзотические и также исштрихованные валуны, дропстоуны (отдельные твердые обломки, как бы взвешенные в глинистом или алевроитовом материале, образовавшиеся при выпадении из айсбергов на морское дно), наконец тиллиты (аналоги четвертичных морен) и ленточные глины (отложения приледниковых озер). Обширность площади, покрытой льдом, требовала объяснения, и наиболее убедительное, хотя далеко не сразу получившее признание, было предложено в 1915 г. А. Вегенером. Он предположил, что в позднем палеозое материка, охваченные оледенением, входили в состав единого суперконтинента - Гондваны. Проведенные много позже палеомагнитные исследования подтвердили эту гипотезу и показали, что Гондвана в то время занимала

Южную полярную область Земли. В Северной полярной области преобладали морские условия, но кое-где, в частности в Северо-Восточной Сибири, обнаруживаются осадочные образования, содержащие дрипстоуны; в Верхоянье они получили образное название «рябчиков», а позднепалеозойская морская фауна этой области состоит из холодолюбивых организмов. Современные данные доказывают, что позднепалеозойское оледенение началось в раннем карбоне в Южной Америке и Африке и продолжалось до казанского века поздней перми, т.е. имело общую длительность порядка 90 млн. лет, вдвое превосходящую длительность последнего ледникового периода (который, однако, нельзя считать завершившимся). За это время положение материков, составлявших Гондвану, относительно южного полюса заметно изменялось, и соответственно изменялись очертания ледникового покрова (рис. 13).

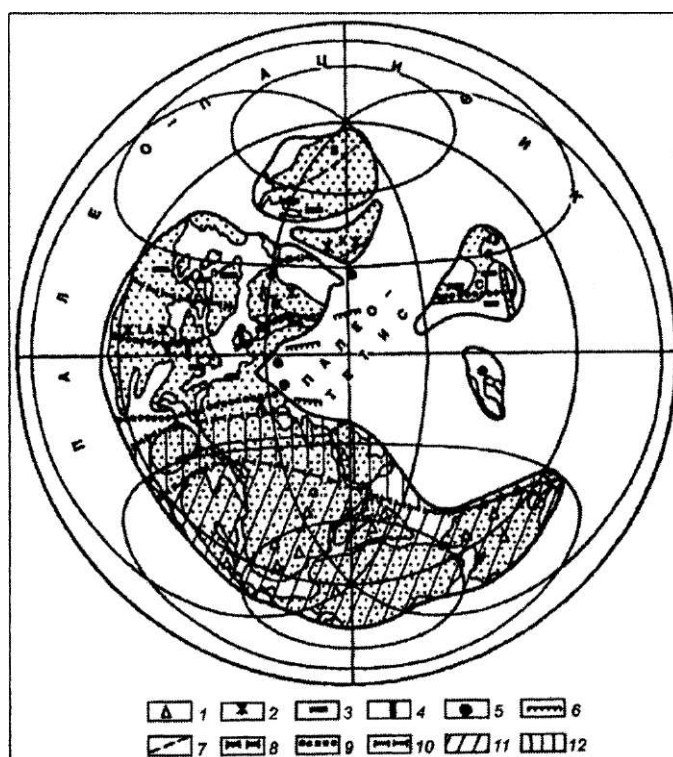


Рис. 13. Позднепалеозойское оледенение Гондваны, по Л.П. Зоненшайну (основа) и Н.А. Ясаманову (климатическая зональность)

S-Сибирь; LA-Лавразия; G-Гондвана; С-Китай; К-Казахстан. 1 - тиллиты; 2 - красноцветы; 3 - лигниты; 4 - латериты; 5 - теплолюбивая фауна; 6 - рифовые постройки; 7-10 - границы климатических поясов: 7 - экваториального, 8 - тропического и субтропического, 9 - субтропического и умеренного, 10 - умеренного и холодного; 11 - горное оледенение; 12 - материковое оледенение

Поэтому начало и конец оледенения различались на разных материках, а обширность территории, охваченной позднепалеозойским оледенением, является результатом наложения нескольких разновозрастных и занимавших каждый более ограниченную площадь ледниковых покровов.

Аналогично тому, как последний ледниковый период совпал с альпийской эрой горообразования, позднепалеозойский довольно точно совпадает с герцинской эрой, и оледенение Гондваны, частично в Андах, могло носить горный характер. Но, чтобы вызвать крупное покровное оледенение, одного горообразования было недостаточно. Это доказывает пример киммерийской, мезозойской эры горообразования, которая не сопровождалась подобным эффектом.

В 30-е годы прошлого века появились сведения о следах позднедевонского оледенения в Южной Америке (в Бразилии и Аргентине), а затем в Африке (в Нигере и Гане). Истинные размеры площади Гондваны, охваченной этим оледенением, неизвестны. Она может включать, в частности, и Южную Африку. Возможно, это позднедевонское оледенение является началом позднепалеозойского, поскольку последнее развивалось уже с турнейского века раннего карбона. Вместе с тем можно указать на некоторое совпадение (с запозданием) с акадской эпохой тектогенеза.

В 60-е годы прошлого века французские геологи обнаружили в центре Сахары, на северной периферии горного массива Ахаггар, следы еще более раннего палеозойского оледенения, приходящегося на поздний ордовик. В дальнейшем они были установлены повсеместно в Африке, от Марокко и Ливии до Капской провинции ЮАР, а также в Западной Европе (Испания, Франция, Германия), на востоке Северной Америки и в Южной Америке. Предполагается, что эти районы Европы и Северной Америки тогда принадлежали северной периферии Гондваны. На крайнем юге Африки и в Южной Америке (в Бразилии) оледенение сохранялось и в раннем силуре (Hambrey, 1985). Таким образом, общая продолжительность этого ледникового периода составляет около 35 млн. лет (карадок-венлок), что более чем вдвое меньше позднепалеозойского, но сопоставимо с кайнозойским (правда, еще не закончившимся). Очевидно также, что это оледенение охватывало меньшую площадь.

Но, как и в позднем палеозое, Гондвана, по крайней мере та ее часть, которая подверглась оледенению, с Африкой в центре находилась в Южной полярной области. Следует отметить еще, что позднеордовикское-раннесилурийское оледенение совпало с одной из главных эпох каледонского орогенеза - таконской.

Позднеордовикскому-раннесилурийскому оледенению предшествовало гораздо более обширное, вероятно даже превосходившее по площади позднепалеозойское, оледенение самого конца рифея - раннего венда (Hambrey, Harland, 1985). Оно было впервые установлено на крайнем севере Норвегии, где и получило название варангерского, или лапландского. Следы этого оледенения встречены в Северной Америке (в Кордильерах от Калифорнии до Аляски) (Hoffman, 1990),

в Европе (от Скандинавии до Урала и запада Русской плиты), в Азии (Сибирь, Китай), в Африке и Австралии.

Таким образом, позднерифейское-ранневендское оледенение носило глобальный характер и, по оценке Н.М. Чумакова (1992), не уступало по своему масштабу последнему, кайнозойскому оледенению. Даже если допустить, что материки в то время располагались более компактно, и это, в общем, согласуется с палеомагнитными данными, все равно это оледенение должно было распространяться до очень низких широт. В Южной Австралии это было опять-таки недавно подтверждено прямыми палеомагнитными определениями. Предложено много гипотез, пытающихся объяснить этот парадокс - от совершенно фантастических до более правдоподобных. К последним относится гипотеза об ослаблении парникового эффекта вследствие интенсивного накопления в позднем рифее карбонатов, с изъятием из атмосферы большого количества углекислого газа (Worsley, Kidder, 1991). Необходимо, однако, отметить, что позднерифейское карбонатонакопление по своему масштабу не представляло ничего особенно выдающегося по сравнению с происходившим в некоторые эпохи фанерозоя, например, в позднем девоне - раннем карбоне или позднем мелу. Другая гипотеза связывает вендское оледенение со значительным увеличением наклона земной оси. Но это предположение маловероятно, так как в позднем докембрии Земля вращалась быстрее, чем в современную эпоху, и, следовательно, наклон оси ее вращения должен был быть не большим, а меньшим.

К числу гипотез, заслуживающих более серьезного внимания, следует отнести гипотезу, допускающую, что Земля при движении по своей галактической орбите могла в позднем докембрии пересекать скопление межзвездной пыли.

Во всяком случае, ясно, что это оледенение являлось действительно глобальным и что оно само, или, по крайней мере, разнос его продуктов, вероятно, айсбергами, достигало низких широт. Учитывая недостаточную изученность хронологии этого оледенения, можно по аналогии с позднепалеозойским допустить, что его ареал смещался во времени вслед за перемещением континентов относительно полюса, и поэтому суммарный ареал был значительно шире такового каждого оледенения в отдельности. Однако и это не полностью решает проблему.

Временной интервал варангерского оледенения определен в 610-590 млн. лет т.н. Следовательно, теплый период, отделявший его от позднеордовикского оледенения, составлял 140 млн. лет. Основное тектоническое событие, которое предшествовало и сопровождало варангерскому оледенению - байкальский орогенез. В Европе он известен как кадомский, в Африке - панафриканский, в Южной Америке - бразильский. Этот орогенез привел к становлению суперконтинента Гондваны, спаяв отдельные континентальные блоки, которые до того разделялись позднерифейскими морскими бассейнами. В пределах будущей Лавразии роль байкальского орогенеза была менее значительной. Она заключалась в основном в некотором аккреционном разрастании Восточно-Европейского и Сибирского кратонов за счет Палеоазиатского океана.

Варангерское оледенение не было единственным в позднем протерозое. Несколько раньше, примерно в интервале 850-800 млн. лет т.н., в позднем рифее, имело место другое покровное оледенение. Следы обоих оледенений - ранне-вендского и позднерифейского - наиболее четко представлены в Южной Австралии, где первое известно под названием меринейского, а второе - стертого. Два оледенения в позднем протерозое проявлены и в Экваториальной Африке (Конго, Замбия), а также недавно установлены в горах Маккензи в Северо-Западной Канаде. Следы позднерифейского оледенения обнаружены и в Скандинавии, Западной Африке (синеклиза Таудени), в Южной Америке (синеклиза Сан-Франсиску), в Сибири (Патомское нагорье), в Китае (платформа Янцзы). Таким образом, распространение этого оледенения также было весьма широким, хотя, возможно, и уступало варангерскому. Впрочем, не исключено, что в позднем рифее проявилось не одно, а два отдельных оледенения, на уровнях около 850 и 750 или 900 и 800 млн. лет т.н. Как и все другие оледенения, о которых шла речь выше, поздне-рифейское оледенение совпало по времени с эпохой орогенеза, проявившейся в середине позднего рифея, примерно на уровне 850 млн. лет т.н., и представлявшей раннюю фазу байкальского орогенеза. Она ярко выражена в Сибири, Китае, Индии и в ряде других регионов Земли.

Существуют некоторые данные о проявлении покровных оледенений в конце среднего рифея (1,2-1,1 млрд. лет т.н.). Если они реальны, то можно снова констатировать совпадение с крупной эпохой орогенеза: гренвилльской - по северо-американской номенклатуре, дальсландской - по западноевропейской, исседонской - по казахстанской.

Наиболее ранним достоверно установленным ледниковым периодом в истории Земли является раннепротерозойский. Его следы были впервые обнаружены в гуронской «системе» (надгруппе) Канадского щита в виде тиллитов Говганда, ныне датированных 2 млрд. лет. На признаки столь же древнего оледенения указывают исследователи ятулийских отложений Карелии.

В литературе имеются указания на еще более древнее, позднеархейское (2,8 млрд. лет т.н.) оледенение, следы которого были найдены в надгруппе Витватерсранд Южной Африки, знаменитой своей золото- и ураноносностью.

Итак, не подлежит сомнению, что наша Земля на протяжении последних почти 3 млрд. лет неоднократно переживала периоды глобальных покровных оледенений (рис. 14).

Хронология покровных оледенений в истории Земли может быть уточнена и пополнена по сводкам (Crowell, 1999; Evans, 2000), а также некоторыми другими работами следующим образом.

Самое древнее оледенение, установление в Южной Африке (Каапваальский эократон), датировано в 2,9 млрд. лет (Young et al., 1998). Перигляциальные образования несколько более молодого, но также позднеархейского возраста - 2,53 млрд. лет, обнаружены в Танзанийском эократоне в Восточно-Центральной Африке.

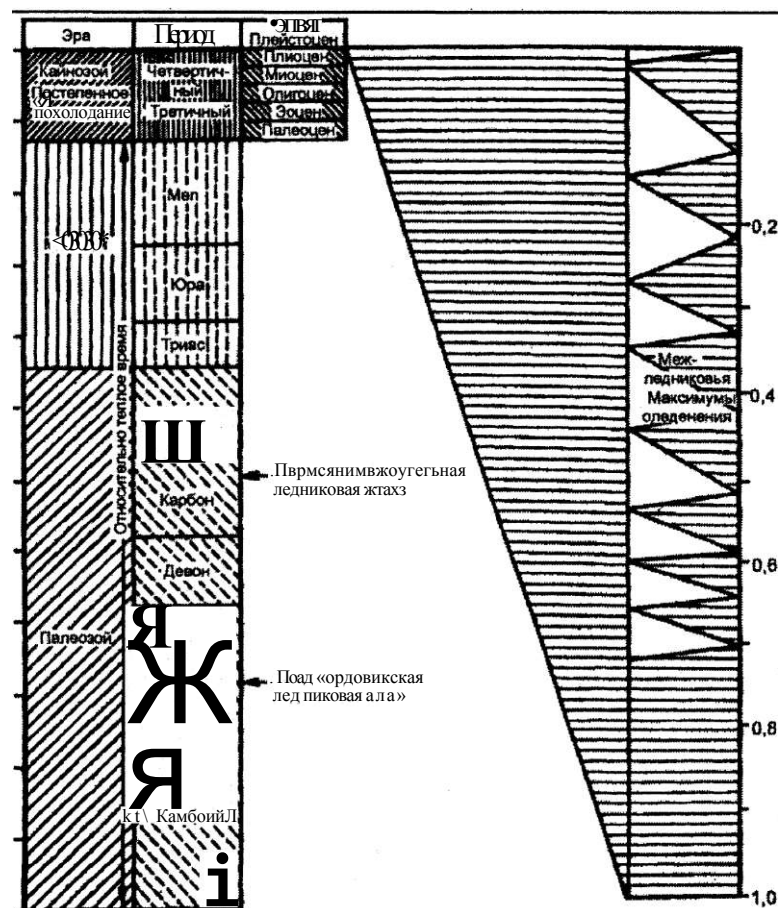


Рис. 14. Изменения климата Земли за последние 570 млн. лет ее истории, охватывающей 4,6 млрд. лет (Кови, 1984)

Раннепротерозойский ледниковый период, согласно сводке Дж. Кроуэлла, имеет возраст в интервале 2,4-2,2 млрд. лет; его наиболее достоверные следы по-прежнему относятся к Канадскому щиту. Имеются указания на проявление оледенений в конце среднего протерозоя с возрастом 1,1-1,0 млрд. лет на том же Канадском щите и в Западной, а, возможно, и в Центральной Африке, но они считаются мало достоверными (Evans, 2000).

В позднем протерозое покровные оледенения получили наиболее мощное развитие, возможно, за всю историю Земли. Их следы установлены на всех континентах, причем наиболее четко фиксируются два интервала - позднерифейский, 740-720 млн. лет т.н. (все континенты), и ранневендский, 620-600 млн. лет т.н. (большинство континентов). Первый период известен в Австралии под назва-

нием стертского (Sturtian), в Северной Америке - рапитанского (Rapitan), второй в Европе давно известен как варангерский, или лапландский, а в Австралии как меринийский (Marinoan). В мировой геохронологической шкале его даже предложено выделять в качестве криогения в составе неопротерозойской эры. Но в литературе имеются указания о несколько более поздних ледниковых эпохах: 580—570 млн. лет т.н. (поздний венд, Авалония-Кадомия) и 454 млн. лет т.н. (граница венда-кембрия, Лаврентия, Западная Африка, Южная Америка).

Палеозойские оледенения, согласно сводке Дж. Кроуэлла, датируются таким образом:

445-429 млн. лет, поздний ордовик - ранний силур;

363-353 млн. лет, поздний девон - ранний карбон;

338-256 млн. лет, поздний палеозой.

Начало позднекайнозойского оледенения Антарктиды определено не позднее 38 млн. лет т.н., а Арктики - 2,7 млн. лет т.н.

В последние полтора десятилетия наибольшее внимание привлекла и вызвала жаркую полемику упоминавшаяся уже проблема климатического парадокса, связанная с позднепротерозойским оледенением. Напомним, что она заключается в том, что следы этого оледенения (оледенений) обнаружены преимущественно в низких (<30°) широтах; кроме того, в ряде районов тиллиты или тиллоиды непосредственно перекрываются карбонатами, свидетельствующими о теплом климате.

В связи с этими данными калифорнийский ученый Дж. Киршвинк в 1992 году предложил гипотезу, согласно которой вся Земля в неопротерозое представляла огромный снежный шар, а ледники распространялись до экватора. Эта гипотеза под названием «Snowball Earth» получила особую популярность после появления в 1998 г. работы П. Хоффмана с соавторами из Гарварда (Hoffman et al., 1998). В этой работе были приведены данные по изотопии углерода хтя позднего неопротерозоя, указывающие, по мнению этих ученых, на полное затухание биологической продуктивности океанских вод в эту эпоху. Появление же карбонатов в кровле тиллитов трактуется как проявление резкого потепления климата вследствие увеличения содержания СО₂ в атмосфере и соответственно усиления парникового эффекта. С этим событием, очевидно, не случайно совпало появление в позднем венде богатой фауны бесскелетных беспозвоночных, известной под названием эдиакарской.

Палеомагнитные данные, легшие в основу гипотезы «Снежного шара», подверглись критической ревизии в работе (Meert, van der Voo, 1994). Эти авторы пришли к заключению, что нет достоверных определений, указывающих на образование ледниковых отложений в тропических широтах. Однако в более позднем обзоре (Evans, 2000), учитывающем новые геохронологические и палеомагнитные определения, сделан совершенно противоположный вывод - нет ни одного надежного определения, указывающего на высокие широты. Таким образом, гипотеза «Снежного шара» сохранила свое правдоподобие. Оставалось, впрочем,

неизвестным, охватывало ли неопротерозойское оледенение весь земной шар, включая океаны, или оставалось незамерзшее водное пространство в собственно экваториальной зоне?

На этот вопрос попытались ответить с помощью моделирования климата подобного климату ледникового периода. Первую попытку в этом направлении предпринял еще в 60-е годы русский ученый М.И. Будыко, определяя баланс между поступающим на Землю солнечным излучением и отдачей его Землей. Он пришел к выводу, что однажды подвергшаяся оледенению Земля не могла бы вернуться в первоначальное состояние. Это исследование показало, что большую трудность представляет объяснение исчезновения ледникового покрова, которое к тому же произошло чрезвычайно быстро, чуть ли не в течение двух тысяч лет, чем возникновение оледенения. Как мы увидим ниже, появилось неожиданное возражение, позволившее отодвинуть этот парадокс. В последнее время были предприняты новые попытки смоделировать позднепротерозойский климат с использованием компьютерной техники и исходя из модели «Снежного шара» (Hyde et al., 2000; Kerr, 2001). Результатом явилась разработка модели, в которой в экваториальной области остается незамерзшее пространство. Эта, более «мягкая», версия гипотезы «Снежного шара» открывает возможность выживания планктонных организмов в личиночной стадии, подготовив их последующую диверсификацию (Runnegar, 2000).

Дискуссия между сторонниками двух версий концепции «Snowball Earth» - крайней, с принятием полного оледенения Земли, и умеренной, с допущением сохранения незамерзшего приэкваториального океанского пространства, продолжилась публикацией в журнале «Nature» дискуссионных статей (Schrag, Hoffman, 2001; Hyde et al, 2001) под общим заглавием «Life, geology and Snowball Earth» (Nature, 2001, v.409, p.306).

Отметим также работу (Kennedy et al., 2001); эти исследователи в основу своих рассуждений положили изучение изменений отношений изотопов углерода в ледниковую и послеледниковую эпоху. В отличие от П. Хоффмана и Д. Шрага, они установили на примерах из Африки, Австралии и Северной Америки, что резкое снижение $\delta^{13}\text{C}$ свойственно лишь послеледниковым карбонатам, так называемой карбонатной крышке. Отсюда следует, что предположение П. Хоффмана о связи снижения $\delta^{13}\text{C}$ в ледниковые эпохи с отмиранием экосистем вследствие полного замерзания океанов не имеет под собой основания. Авторы данной работы считают также несостоятельным объяснение обратного повышения $\delta^{13}\text{C}$ в кровле карбонатных крышек усилением выветривания пород суши после таяния ледникового покрова.

Между тем М. Кеннеди и др. объясняют понижение $\delta^{13}\text{C}$ в карбонатных крышках биологическим (микробиальным) окислением метана, высвободившегося из содержащихся в вечномерзлом слое газогидратов при затоплении суши водами таявших ледников. В общем, представляется, что «мягкий вариант» позднепротерозойского глобального оледенения, оставляющий незатронутыми цент-

ральные части океанов, предпочтительнее первоначального «жесткого» варианта полного превращения Земли в снежный шар.

Одним из последних, на время написания настоящей книги, событий в дискуссии по проблеме «Snowballe Earth» явилась конференция на юге Швейцарии, состоявшаяся в июне 2006 г. и специально ей посвященная. Она собрала 75 участников - специалистов в различных областях знаний из различных стран - и продолжалась пять дней. Дискуссию по проблеме осветил в своем обзоре в журнале Лондонского геологического общества Филлин Ален. Эти итоги в общем мало утешительны для данной гипотезы, по крайней мере в ее первоначальном «жестком» варианте. По словам Ф.Алена, конференция почти достигла консенсуса в отношении того, что некоторое (some) оледенение действительно произошло в нижних широтах на уровне моря, что одно из этих оледенений заложило в двух далеко стоящих друг от друга регионах синхронно - 635 млн. лет т.н., и что послеледниковая трансгрессия и отложение покровных карбонатов были продолжительными и диахронными. На этом, собственно, и заканчивается достигнутый консенсус. Предметом разногласий остались масштаб оледенений (явно не общеглобальный), их число, время и продолжительность. Скепсис вызвала и применимость численного моделирования климата (Allen, 2007).

Н.М. Чумаков (2001a, б), рассмотрев последовательность великих оледенений в течение неопротерозоя и фанерозоя, пришел к выводу об их периодическом проявлении примерно через каждые 150 млн. лет и сопоставил их с проявлениями эндогенной активности Земли (рис. 15) и, прежде всего, вулканизмом двух типов - островодужным и плюмовым. Это сопоставление привело Н.М. Чумакова к заключению, что «усиление островодужного вулканизма, с которым связан эксплозивный тип извержений, приводило к снижению прозрачности атмосферы, понижению температуры на Земле и оледенениям. Ослабление островодужного вулканизма во время главных тектонических фаз способствовало увеличению прозрачности атмосферы. Метаморфизм, размыв осадочных углеродсодержащих толщ орогенов, а также рост интенсивности вулканизма, в том числе мантийно-плюмового, представляют главные источники увеличения содержания CO_2 в атмосфере. Их совместное проявление во время главных тектонических фаз привело к существенному усилению парникового эффекта, быстрому потеплению и прекращению оледенений» (Чумаков, 2001a, с. 658-659).

Напомним, что один из авторов данной книги в выводах о причинах великих оледенений в заключении к соответствующей главе (Хаин, 1994), наряду с компактным расположением крупных континентальных масс преимущественно в полярных и приполярных областях и возникновением в их пределах мощных горных систем, т.е. орогенезом, указывал на снижение содержания CO_2 в атмосфере, влекущее за собой понижение парникового эффекта.

Теперь соображения Н.М. Чумакова позволяют развить и конкретизировать это положение, увязав его с ритмом эндогенной активности Земли. Следует упомянуть еще два момента, отмеченные Н.М. Чумаковым: во-первых, некоторое

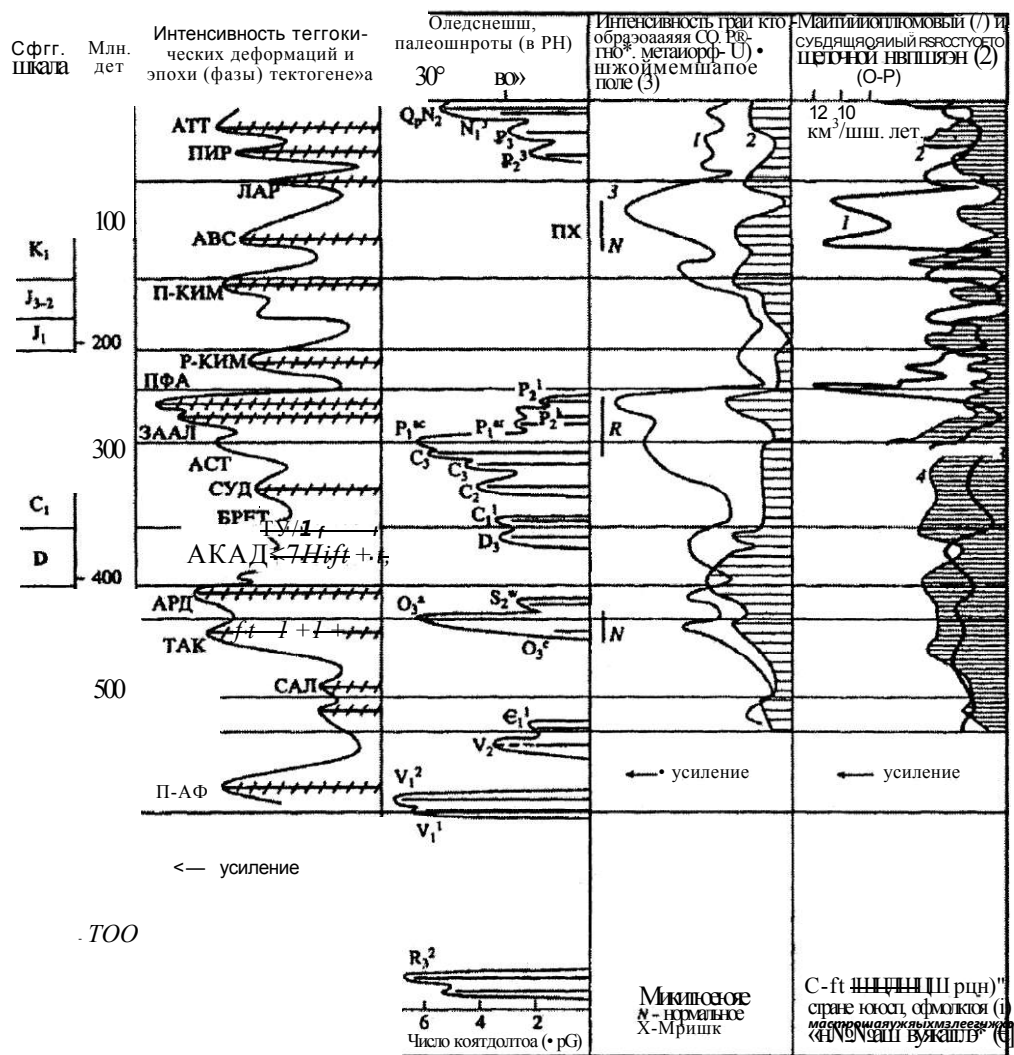


Рис. 15. Оледенения и некоторые тектонические и магматические события в фанерозое, венде и позднем рифее (Чумаков, 2001а, б)

Тектонические эпохи (фазы): АТТ - аттическая; ПИР - пиренейская; ЛАР - ларамийская; АВС - австрийская; П-КИМ - позднекимммерийская; Р-КИМ - раннекимммерийская; ПФА - пфальцкая; ЗААЛ - заальская; АСТ - астурийская; СУД - судетская; БРЕТ - бретонская; АКАД - акадская; АРД - арденская; ТАК - таконская; САЛ - салаирская; П - панафриканская; ПХ - мезозойское похолодание

смещение во времени циклов великих оледенений по отношению к тектоническим циклам Бертрана, и, во-вторых, вариации в проявлении островодужного и плюмового магматизма с периодом в десятки миллионов лет, которые могут быть

сопоставлены с циклами Штилле и объяснить климатические колебания подчиненного порядка по отношению к циклам «великих оледенений».

В другой работе Н.М. Чумаков (20016) выделяет в климатической истории Земли три этапа: 1 - безледниковый (большая часть архея и, добавим, хадей); 2 - с редкими эпизодическими оледенениями (поздний архей, ранний протерозой, ранний и средний рифей) и 3 - с частыми периодическими оледенениями (поздний и, возможно, часть среднего рифея, венд, фанерозой). Он отмечает примерное совпадение этих этапов с этапами становления плитной тектоники Земли.

1.6. непрерывность или прерывистость в развитии природы

Проблема, вернее дилемма, обозначенная в названии данного раздела, служит предметом разногласий между естествоиспытателями на протяжении всей истории геологии и биологии, со времен античности и Возрождения. По мнению известного турецкого геолога Дж. Шенгёра (Şengör, 1991), истоки ее восходят к полемике между выдающимися древнегреческими философами Аристотелем и Демокритом. Между тем, как будет показано ниже, противоречие между этими двумя на первый взгляд противоположными концепциями является лишь кажущимся, и в развитии Земли и обитающих на ней живых существ «градуализм» и «пунктуализм» органически сочетаются.

Но прежде чем перейти к анализу проблемы по существу, отметим, что она имеет еще один важный аспект. Признание непрерывности и постепенности в течении геологических процессов обычно предполагает, что в прошлом они по своей сути и скорости не должны были сколько-нибудь существенно отличаться от современных процессов, поддающихся непосредственному наблюдению. Отсюда знаменитое выражение Ч. Ляйеля: «Настоящее - ключ к прошедшему», здесь исток метода актуализма, широко и с успехом применяемого в геологических науках. Крайняя форма актуализма - это униформизм, принимающий полное тождество современных и древних геологических процессов. В основополагающем труде Ч. Ляйеля «Основы геологии» по существу декларируется как раз униформизм.

Между тем сторонники противоположной концепции - пунктуализма, как его теперь предпочитают называть, доказывают, что в геологическом прошлом процессы изменения лика Земли, ее коры и литосферы могли по форме проявления и **в** особенности по интенсивности, скорости своего протекания значительно отличаться от своих современных аналогов.

В частности, что особенно важно, сторонники данной концепции допускают, что в прошлом имели место крупные события, настоящие геологические катастрофы, которые могли приводить к внезапным и очень значительным изменениям

в рельефе Земли, в структуре коры, в составе органического мира. Противники этих взглядов называли своих оппонентов катастрофистами, а соответствующее научное течение - катастрофизмом, и этот ярлык приобрел в устах многих ученых бранный оттенок.

Теперь посмотрим, как же обстоит дело в действительности, и начнем с характеристики хода геологических процессов, эндогенных и экзогенных, в современную эпоху и в недавнем историческом прошлом, для которого имеются документальные свидетельства.

Прежде всего надо констатировать, что, как на наших глазах, так и в течение жизни предыдущих поколений протекают и протекали все геологические процессы, действие которых известно из геологического прошлого - вулканизм, сейсмичность, тектонические движения и деформации, деятельность рек, озер, морей, океанов, подземных вод и ледников, выветривание. А геологическая летопись показывает, что процессы эти, причем в форме, достаточно близкой к современной (но это не касается их темпа), проявлялись уже 4-3,5 млрд. лет т.н., т.е. со времени образования первых датированных горных пород. Однако уже здесь надо обратить внимание на одно замечательное исключение - деятельность ледников и явление вечной мерзлоты, столь ярко выраженные в современную эпоху, были свойственны лишь отдельным отрезкам геологического времени и, насколько известно, не проявлялись вообще до 2,2 млрд. лет т.н., если не учитывать возможное наличие следов древнего оледенения в позднем архее (2,8 млрд. лет т.н.) в Южной Африке (Витватерсранд). Не подлежит сомнению и то обстоятельство, что такие, в общем медленно протекающие, геологические процессы, как речная эрозия, морская абразия, растворяющее действие поверхностных и подземных вод (карстообразование), поднятие и опускание земной поверхности, связанные с тектоническими движениями, интегрируясь в геологическом времени с его огромной длительностью, могут приводить к крупным изменениям в рельефе земной поверхности и в структуре земной коры, что подметили еще Дж. Хаттон (Геттон) и Ч. Ляйель. Более того, если экстраполировать современную скорость поднятия некоторых участков суши* хотя бы на последние несколько миллионов лет, если не меньше, на некоторых участках нынешних равнин должны были образоваться высокие горы.

Однако как наблюдения над современными процессами, так и изучение событий недавнего прошлого убедительно свидетельствуют о другом. Медленный и постепенный ход геологических процессов периодически прерывался их резким ускорением. Характерный пример - тектонические движения. Их скорость обычно измеряется миллиметрами или даже долями миллиметра, реже сантиметрами (горизонтальные движения) в год. Между тем, во время крупных землетрясений на Аляске, в Калифорнии, Чили, Монголии, Ассаме (Индия) и в других регионах, за считанные секунды отмечались смещения почвы иногда более чем на 10 м, т.е.

* Имеются в виду скорости современных движений, показанные на опубликованной в 1973 г. карте под редакцией Ю.А. Мещерякова.

со скоростью, на несколько порядков выше скорости так называемых вековых движений. Известно, что крупные землетрясения, очаги которых располагаются под дном океанов, вызывают огромные волны - цунами, заметно преобразующие океанские берега. А на суше они провоцируют образование оползней и обвалов, сход лавин, особенно в горных районах.

Поднятия горных сооружений происходят явно неравномерно, временами заметно усиливаясь, что находит отражение в темпах эрозии и седиментации. Так, хотя Гималаев отмечены фазы усиления эрозии (более 1 мм/год) на рубежах 22, 20.18, 15, 12 и 5 млн. лет т.н. По другим данным, две фазы были наиболее значимыми - от 10,9 до 7,5 и после 0,9 млн. лет т.н. (минералогические исследования осадков Бенгальского конуса выноса (Copeland et al., 1993)).

Ярко выраженный эпизодический характер отличает вулканическую деятельность. Извержения вулканов происходят довольно часто. Некоторые вулканы, например Карымский на Камчатке, почти постоянно выбрасывают пепел или даже лаву, но крупные извержения наблюдаются относительно редко (несколько раз в столетие), зато бывают катастрофическими, как извержение Кракатау в 1883 г. или недавнее (1991 г.) извержение вулкана Пинатубо на о-ве Лусон (Филиппины).

Явно эпизодический, и притом периодический, характер носят вулканические излияния на спрединговых осях срединно-океанских хребтов. Их частота колеблется от 100 до 1000 лет на быстроспрединговых и от 5000 до 10000 лет на медленносрединговых хребтах (Галушкин и др., 1994).

Спокойный ход экзогенных процессов, таких, как речная эрозия или морская абразия, нередко прерывается ураганами, особенно в районах, подверженных муссонным ветрам, но не только в их пределах. Ураганы вызывают катастрофические наводнения. За несколько суток речные долины и морские берега испытывают большие изменения в своих очертаниях и рельефе, чем за многие годы.

В разрезе терригенных осадочных толщ - продуктов сноса обломочного материала с суши - седиментологи в настоящее время научились распознавать слои, отложенные в результате действия ураганов, назвав их темпеститами (от англ. tempest - буря, ураган). Геологическому действию бурь, ураганов, смерчей замечательный русский геолог Д.В. Наливкин посвятил специальную монографию (Наливкин, 1969).

Землетрясения, цунами, крупные оползни и обвалы, вулканические извержения, особенно крупные, ураганы - все это, несомненно, геологические катастрофы. Они уносят жизни тысяч, нередко десятков тысяч людей, и не удивительно, что их прогнозированию и возможному смягчению последствий посвящена специальная международная программа.

Крупнейшей катастрофой в новейшей истории Земли, очевидно, была та, что описана в «Ветхом завете» под названием Всемирного потопы. Долгое время, вплоть до работ английских геологов У. Бекленда и А. Седжвика 20-х годов XIX века, это событие воспринималось как реальное, и вся история Земли делилась на две эры - до и после Всемирного потопы. Однако в дальнейшем взгляды «ди-

лювианистов», как их называют (от лат. diluvio - потоп), были отвергнуты и даже осмеяны. Теперь же выясняется, что в ветхозаветном предании содержалась значительная доля истины. Недавно австрийские ученые из Венского Университета Эдит Кристан-Тольман и Александр Тольман опубликовали серьезное исследование (Christian-Tollman, Thollman, 1991), в котором на основании анализа различных источников, была установлена даже точная дата события - 23 сентября 9545 г. до н.э., т.е. в начале голоцена.

Само событие, трактуемое как столкновение с Землей кометы, основные поломки которой упали в океан, породило землетрясение небывалой силы, мощные извержения вулканов, огромные волны цунами, ураганы и ливни глобального масштаба, резкое повышение температуры, лесные пожары, общее затемнение, затем похолодание (типа «ядерной зимы»). Вследствие «потопа» исчез ряд представителей существовавшей тогда наземной фауны, в том числе мамонты, а первобытные люди уцелели лишь в пещерах. Одним из свидетельств этого события является выпадение дождя из стеклянных шариков-тектитов на огромном пространстве, охватывающем Азию, Австралию, Южную Индию, Мадагаскар. Возраст тектитосодержащих слоев во Вьетнаме - около 10 тыс. лет (Изох, 1991) - совпадает с датировкой «потопа», установленной супругами Тольман по другим данным: по годичным кольцам деревьев, по резкому увеличению содержания кислот в ледниковом покрове Гренландии, по времени исчезновения мамонтов в Сибири.

Имеются все основания предполагать, что подобные катастрофы, вызванные столкновениями с кометами (вспомним еще Тунгусское событие) или падение крупных метеоритов (астероидов), неоднократно повторялись в более ранние геологические эпохи и были причиной «великих вымираний» фауны и флоры. К списку природных катастроф чисто земного происхождения надо добавить катастрофы, связанные с взаимодействием Земля-Космос.

Итак, данные о современных геологических процессах, как эндогенных, так и экзогенных, показывают, что они протекают непрерывно-прерывисто, что их медленное и постепенное течение прерывается резкими ускорениями, эффект которых за короткие интервалы времени намного превосходит эффект медленных изменений в разделяющие эти ускорения гораздо более длительные отрезки времени.

Посмотрим теперь, можно ли распространить этот вывод на более отдаленное и неизмеримо более продолжительное геологическое время. Весьма ценный материал в этом отношении дает изучение разрезов осадочных толщ методами сейсмостратиграфии и микропалеонтологии в сочетании с данными бурения на суше и в океане.

Временные сейсмические разрезы наглядно показывают, что накопление осадочных толщ представляло непрерывно-прерывистый процесс, с неоднократным частичным размывом и переложением осадков. Данные микропалеонтологии показывают, что стратиграфические зоны, длительность которых не превышает

первые миллионы лет, могут рассматриваться как глобальные подразделения с изохронными границами. Это положение в корне противоречит еще недавно существовавшему представлению большинства специалистов о невыдержанности во времени, метахронности даже крупных стратиграфических подразделений. Перерывы в накоплении осадков, благодаря их широкому пространственному проявлению, стали основой для выделения стратиграфических единиц в так называемой событийной стратиграфии.

С другой стороны, сопоставление сейсмических разрезов пассивных континентальных окраин и наблюдаемых в них перерывов и литологических изменений дало основание П. Вэйлу и его соавторам (Vail et al., 1977; Haq et al., 1987) для построения ставшей широко известной кривой трансгрессий и регрессий Мирового океана. Одной из особенностей этой кривой является асимметрия выделенных на ней циклов изменений уровня Мирового океана разных порядков: трансгрессиям отвечают более пологие участки кривой, регрессиям - более крутые, т.е. переход от трансгрессий к регрессиям происходит резко, и регрессии более кратковременны, представляя скачки в развитии колебаний уровня океана.

Построения П. Вэйла неоднократно и частично справедливо критиковали. Критика сосредотачивается вокруг трех пунктов: во-первых, использованные разрезы недостаточно представительны, чтобы на них основывались глобальные построения; во-вторых, эти разрезы отражают не только глобальные, но и региональные, свойственные каждому из них особенности, вытекающие из различной тектонической истории данного региона; в-третьих, существуют иные, чем эвстатические, факторы, которые не могут определить поднятие континентов, например горизонтальный стресс, связанный с коллизией литосферных плит.

Еще одно возражение касается специально циклов третьего порядка длительностью в 0,5—4,5, а в среднем 1,6 млн. лет, для мелового периода. Как указывает Э. Миелл (Miall, 1992), точность выделения этих циклов выше, чем точность хроностратиграфического расчленения, поэтому корреляция реальных литостратиграфических шкал со шкалой Эксон (Вэйла) может быть совершенно неоднозначной.

Эти замечания в определенной мере справедливы, и, тем не менее, при всем своем неполном совершенстве и, вероятно, неоправданной детализации кривая Вэйла, несомненно, правильно отражает общий ход колебаний уровня океана, особенно начиная с юрского периода, и согласуется с другими данными. А она указывает, в частности, на относительную быстротечность отрицательных колебаний уровня океана.

То важнейшее обстоятельство, что строение осадочной оболочки Земли, ее стратисферы, запечатлело непрерывно-прерывистый процесс осадконакопления в глобальном масштабе, вполне соответствует и характеру смены фауны и флоры во времени, зафиксированной в стратисфере. По существу, именно прерывистость летописи истории органического мира способствовала не только поразительной скорости разработки общей стратиграфической шкалы в первой четверти XIX

века, но и тому, что эта шкала оказалась в основных чертах пригодной в глобальном масштабе, хотя была первоначально разработана лишь на западноевропейском материале. Но еще до ввода в стратиграфию палеонтологического метода И. Леман и Г. Фюксель предложили для пермских и триасовых отложений Саксонии литолого-стратиграфическое подразделение, основанное, по существу, на дискретности изменений их литологического состава во времени.

Прерывистый характер эвстатических колебаний уровня океана для четвертичного периода подтверждается и лестницами речных и морских террас, образование которых является результатом взаимодействия тектонических поднятий суши и этих колебаний.

Мы подошли теперь к наиболее острому вопросу в дискуссии о характере проявления геологических процессов - о развитии во времени тектонических деформаций сжатия, ведущих к образованию складок, надвигов и шарьяжей. По этому вопросу достаточно давно сформировались две противоположные концепции. Одна из них берет начало еще в XVII веке, во взглядах основоположника тектоники флорентийца датского происхождения Н. Стенона. Он первым истолковал угловые несогласия между более молодыми и более древними отложениями Тосканы как свидетельство того, что вторые, после своего накопления и перед накоплением первых, подверглись деформации и были дислоцированы. Следовательно, угловые несогласия - свидетельство проявления фаз складчатости. Уже в XIX веке аналогичная трактовка была обоснована французом Л. Эли де Бомоном, а в первой четверти XX века немцем Г. Штилле, в работах которого, в наиболее развернутой форме в книге «Основы сравнительной тектоники», изданной в 1924 г., данная концепция была возведена в ранг закона. Согласно Г. Штилле, орогенические движения, к которым он относил в первую очередь складкообразование, проявлялись в истории Земли строго эпизодически, в виде орогенических фаз длительностью в несколько сот тысяч лет, которые были разделены несравненно более длительными «анорогенными» периодами, когда тектонические движения носили лишь характер плавных поднятий и опусканий большого радиуса (эпейрогенез, по Г.К. Гилберту). Эти орогенические фазы, которые Г. Штилле выделил под собственными названиями по месту их типичного проявления в виде угловых несогласий, имели, по его мнению, глобальное значение. В конце 20-х - начале 30-х годов эти взгляды Г. Штилле получили широкое распространение. Повсеместно геологи, изучающие фанерозойские складчатые сооружения, стали искать следы проявления орогенических фаз, перечисленных в «каноне» Штилле.

Между тем ряд не менее крупных ученых, начиная с Дж. Хаттона, и позже Ч. Ляйель и Э. Зюсс, придерживались в своих трудах противоположных взглядов о непрерывном проявлении всех тектонических процессов, включая складко- и горообразование, причем Ч. Ляйель открыто полемизировал по этому поводу с Л. Эли де Бомоном.

Во второй половине 30-х и в 40-е годы прошлого века поднялась волна критики представлений Г. Штилле как в русской, так и в западной литературе. Наибо-

лее развернутую форму она приобрела в работах Н.С. Шатского (1937), который назвал систему взглядов Г. Штилле «неокатастрофизмом», считая, что эти взгляды воскрешают идеи Ж. Кювье и Л. Эли де Бомона. Критические высказывания в адрес закона и канона орогенических фаз мы находим и в выступлениях В.В. Вебера, Д.В. Наливкина, отчасти автора этих строк. В США с критикой взглядов Г. Штилле выступал Дж. Гиллули (Gilluly, 1949), а еще много раньше Шепард, как об этом напомнил Дж. Шенгёр (Sengor, 1991), в Западной Европе - М.Г. Руттен. В чем же суть этой критики и насколько она была справедлива?

Одно из главных возражений состояло в том, что во многих регионах Земли интенсивные орогенические события происходили в периоды, которые Г. Штилле в 1924 г. и даже позднее считал анорогеничными. Это касалось, в частности, кембрия, в течение которого мощный орогенез проявился в Сибири, и не только там: девона с его акадским орогенезом в Северной Америке и его эквивалентами в Австралии, Сибири и Казахстане, Западной Европе (Леонов, 1976); четвертичного периода, который, вопреки Г. Штилле, оказался не только не анорогеничным, но напротив, периодом весьма интенсивных орогенических проявлений, что сам Г. Штилле в конце концов был вынужден признать (Штилле, 1950).

Далее выяснилось, что длительность орогенических фаз следует измерять не сотнями тысяч, а миллионами лет и что эти фазы в действительности могут состоять из целого ряда отдельных импульсов, каждому из которых соответствует угловое несогласие. Это в частности, было хорошо показано Дж. Гиллули на примере неогена нефтегазоносных бассейнов Калифорнии.

Серьезные сомнения вызвал принятый Г. Штилле метод датирования фаз в тех случаях, когда перерыв в осадконакоплении, сопровождаемый угловым несогласием, является достаточно длительным, что весьма часто наблюдается в природе. В подобных случаях Г. Штилле принимал, что орогеническая фаза должна проявиться на том именно временном уровне, где ей было установлено место в его каноне на основании наблюдений в регионах с более узкой возрастной «вилкой» перерыва.

Естественно, что этот метод мог приводить к подгонке фаз под уже известные и к искусственному сокращению их числа.

Но одно из наиболее принципиальных возражений против концепции Г. Штилле было связано с обнаружением в хорошо изученных нефтегазоносных и угленосных бассейнах (Донбасс, Юго-Восточный Кавказ, Фергана) фактов проявления складчатости не только во время перерывов в осадконакоплении, а одновременно с ним, по изменению фаций и мощностей отложений от синклиналей к антиклиналям - так называемая конседиментационная складчатость (рис. 16).

Это дало повод Н.С. Шатскому сделать вывод о том, что угловые несогласия есть не что иное, как вырванные перерывами кадры из непрерывного процесса складкообразования. Действительно, если допустить, что последнее протекает равномерно, за время перерыва происходит как бы его накопление, увеличе-

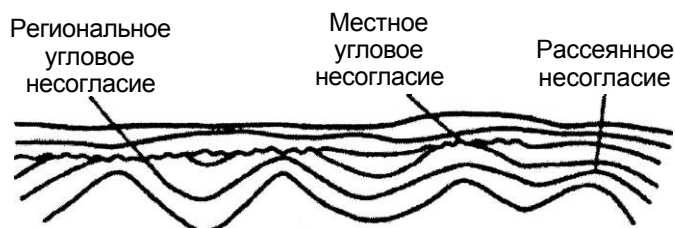


Рис. 16. Конседиментационная складчатость

Переход региональных угловых несогласий в местные и местных угловых несогласий в рассеянное несогласие

ние наклона слоев, «размазанного» по разрезу при непрерывной седиментации (В.Е.Хаин назвал последнее дисперсным несогласием).

Другое, также принципиальное, возражение возникло много позднее, с появлением тектоники плит и изучением строения молодых зон субдукции с их аккреционными призмами. Дело в том, что субдукция, как и спрединг, с которым она взаимосвязана, представляет длительный и непрерывно протекающий процесс, а поскольку складчатость приурочена к зонам конвергенции литосферных плит, и в частности, субдукции, то она также должна протекать непрерывно, что противоречит представлению о дискретности орогенических фаз. Это противоречие было отмечено швейцарским геологом Р. Трюмпи (Trumpp, 1973), и его пытался разъяснить Дж. Шенгёр (Sengor, 1991).

Все приведенные возражения против концепции Г. Штилле в большей или меньшей мере справедливы, и они заставляют сразу же признать непрерывность проявления деформаций тангенциального сжатия, характерных прежде всего и в особенности для конвергентных границ литосферных плит. Но непрерывность еще не означает равномерности. Появляются данные, которые все же свидетельствуют, что представление об орогенических фазах включает и определенную долю истины - интенсивность деформаций то периодически усиливается, то ослабевает, и эта периодичность обнаруживает некоторую глобальную синхронность.

Каковы доказательства только что сказанного в свете приведенной выше критики в адрес концепции Штилле?

Как отмечалось, одним из наиболее серьезных аргументов в этой критике было установление конседиментационной складчатости. Однако более внимательный анализ относительного значения конседиментационного и конденудационного, т.е. происходящего во время перерывов, роста складок показывает, в частности, на примерах тех же Донбасса и Юго-Восточного Кавказа, что скорость этого роста значительно выше во время перерывов. Очевидно, и сами перерывы во многих случаях, особенно локальные, связаны с ускоренным ростом складок и с их поднятием над уровнем моря. Более того, как отметил сам Н.С. Шатский (1951), на перерывы нередко приходится и перестройки плана складчатости. Ина-

че говоря, с перерывами и угловыми несогласиями все же связаны определенные скачки в развитии деформационных процессов. Надо сказать, что ускоренный рост во время перерывов отмечается и для соляных куполов, например Днепровско-Донецкой впадины.

В 60-е годы уральский геолог А.А. Пронин (1969) предпринял трудоемкую работу по сведению всех данных о проявлении угловых несогласий в палеозойских разрезах континентов, т.е. по существу повторил обобщение Г. Штилле, но на гораздо более обширном материале, в определенной мере статистически обработанном. В результате этого исследования оказалось, что большая часть несогласий приходится на стратиграфические интервалы, отвечающие орогеническим фазам Г. Штилле. Результат этого, несомненно, знаменателен.

Другое из наиболее серьезных возражений против представлений Г. Штилле об эпизодичности орогенеза и, следовательно, складчатых деформаций заключается, как было сказано выше, в их противоречии непрерывности действия процессов субдукции, а равно и спрединга.

Однако к настоящему времени стало очевидным, что оба этих основных геодинамических процесса не являются столь уж непрерывными. Как оси спрединга, так и зоны субдукции с их глубоководными желобами периодически испытывают скачкообразные смещения в плане. Более того, через каждые несколько десятков миллионов лет общий план расположения осей спрединга в океанах подвергается перестройке.

Эта перестройка происходит более или менее синхронно в глобальном масштабе, и с эпохами таких перестроек коррелируются орогенические фазы канона Штилле (Ломизе, 1986; Милановский и др., 1992; Хаин, Сеславинский, 1994; Schwan, 1977, 1985). В работе Дж. Шенгёра (Sengor, 1991), содержащей, пожалуй, наиболее суровую критику взглядов Г. Штилле, приводятся два основных примера, якобы доказывающих непрерывность складкообразования и иллюзорность заключений об орогенических фазах на основании угловых несогласий.

Первый пример относится к аккреционным призмам (рис. 17). Дж. Шенгёр стремится доказать, как на теоретической модели, так и на сейсмических профилях через окраины островов Тимор и Барбадос и центрального Орегона, что формирование таких призм протекает длительно и что одновременно с их наращиванием снизу в тылу происходит несогласное перекрытие более молодыми осадками.

Но на профиле через окраину Орегона (рис. 18) видно, что самые молодые отложения клина имеют плиоценовый возраст, а несогласно перекрывающие их осадки относятся к голоцену, в то время как в «автохтоне» присутствует плейстоцен. Следовательно, на плейстоцен здесь приходится перерыв в формировании аккреционного клина, которому и отвечает угловое несогласие между плиоценом и голоценом.

Другой пример в статье Дж. Шенгёра относится к Эгейскому региону, где зона субдукции к югу от острова Крит функционирует с миоцена. Расположен-

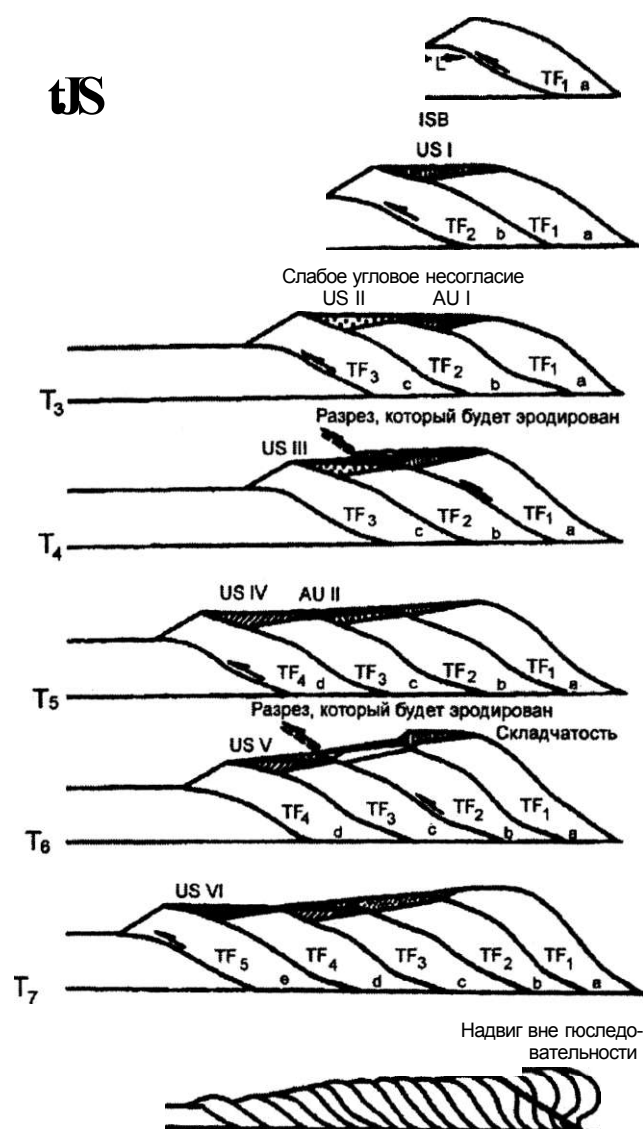


Рис. 17. Последовательное развитие аккреционного надвигового клина между временами T_1 и T_7 (§engor, 1991)

Мощность слоя t составляет 210^3 м, и наибольшее перемещение висячего крыла перед новым нарушением L составляет $1,6 \cdot 10^3$ м. AU - угловое несогласие, F - складчатость, IBS - бассейн внутреннего склона, TF - надвиг, US - несогласно лежащая толща. Следует обратить внимание на то, как эрозия и деформация прогрессивно изолируют отдельные несогласия, способствуют их слиянию в уме картирующего геолога. На врезке - T_7 после аккреции 17 надвиговых чешуй, когда крупный надвиг образуется вне этой последовательности и прорезается через деформированный надвиговый пакет в тылу клина (T_6 - T_2 опущено В. Хаиным)

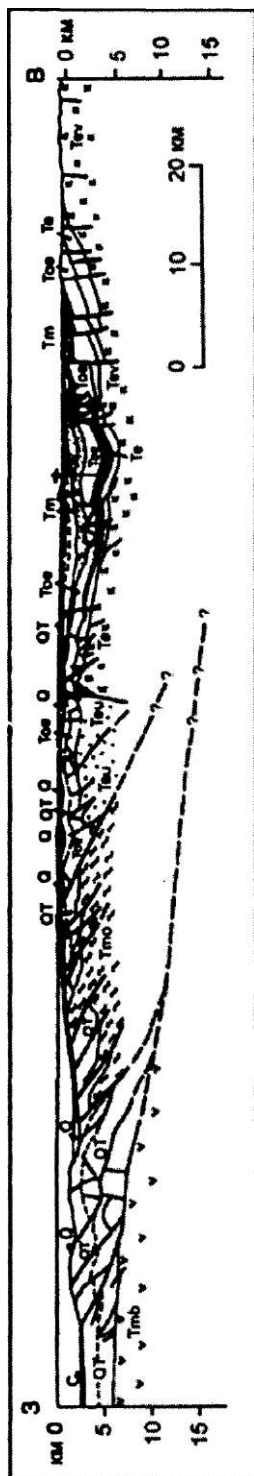


Рис. 18. Сейсмический профиль МОВ через континентальную окраину центрального Орегона (по П. Снейвли, из (Sengor, 1991))

Комментарий Дж. Шенгёра. Обратите внимание на крайне нарушенную структуру аккреционного клина и эпизодический характер деформаций, очевидный из секущих соотношений. Как показано на предыдущем рисунке, эпизодичность, видимая в этом профиле, должна быть кажущейся, «более медленной», чем реальная, видимо, замаскированная слиянием несогласий, отвечающих временным перерывам, меньшим, чем разрешающая способность био- и сейсмостратиграфии

ная в тылу этой зоны область, отвечающая более древней части орогена, испытывала поднятие, а в конце миоцена, в мессинии, оно сменилось растяжением и погружением, которое и привело, в конечном счете, к образованию впадины Эгейского моря и несогласию между домессинскими более молодыми отложениями. Между тем во фронтальной части продолжалось наращивание аккреционного клина. Представляется, что смена сжатия и поднятия растяжением и погружением в Эгейской впадине служит достаточным основанием для установления здесь фазы тектогенеза, которая, кстати, и соответствует выделенной Г. Штиле как раз в этом районе аттической фазе.

Следует отметить, что проведенное глубоководным бурением в сочетании с многоканальной сейсмикой изучение зон субдукции показало, что во многих из них аккреция не проявляется непрерывно, а неоднократно сменяется тектонической эрозией с последующим опусканием соответствующего участка континентальной окраины и перекрытием аккреционного клина более молодыми осадками. Естественно, что при этом между ними возникает угловое несогласие. Дискретность тектоно-магматических событий в мезозое и кайнозое в области типичной северо-западной аккреционной окраины Тихого океана была недавно убедительно показана С.Д. Соколовым (1992).

Вообще говоря, всегда существует принципиальная возможность того, что непрерывный процесс находит прерывистое отражение. Одним из примеров может служить образование турбидитов. Перегрузка внешнего шельфа осадками может явиться причиной их срыва с

его кромки и перемещения мутьевого потока вниз по континентальному склону, к его подножию. Это может происходить и при вполне спокойном состоянии континентальной окраины, но если последняя испытывает проявление сейсмической активности, то становится весьма вероятным, что образование мутьевых потоков и, следовательно, турбидитов произойдет именно во время сейсмического толчка. Другой пример - геоморфологи доказывают, что образование речных террас может иметь место и независимо от изменений положения базиса эрозии. Но если такие изменения происходят, причем скачкообразно и тем более одновременно на значительных расстояниях, то становится очевидным, что формирование террас привязано именно к подобным скачкам.

Возвращаясь к аккреционным клиньям, отметим, что исследователи окраины Тимора, на которые ссылается Дж. Шенглер, отмечают, что деформационный фронт, т.е. внешний край клина, «не мигрирует плавно, а прерывисто смещается к югу по мере того, как образуется соответствующая крупная надвиговая чешуя». Так что и в подобных ситуациях непрерывность сочетается с прерывистостью.

К этому надо добавить, что, если такого рода скачки проявляются более или менее синхронно на значительной площади, например в случае образования тех же турбидитов, отдельные слои которых, в частности на Кавказе, прослеживаются на сотни километров (по данным Н.Б. Вассоевича и В.А. Гроогейма, а позднее С.Л. Афанасьева, занимавшихся коннексией флишевых разрезов), существует большая вероятность наличия некоего синхронизирующего механизма, каковым может быть глобальный ритм эндогенной активности Земли.

Существование такого глобального ритма в масштабе фанерозойской истории Земли находит подтверждение в проведенном К.Б. Сеславинским и В.Е. Хаиным (Хаин, Сеславинский, 1994) полуколичественном анализе тектонической активности нашей планеты в этом эоне. Этот анализ показал реальность не только классических циклов - циклов Бертрона - каледонского и других, но и отдельных эпох повышенной активности, примерно соответствующих орогеническим фазам Г. Штилле, что ранее выявил А.А. Пронин для палеозоя на основании статистики угловых несогласий.

В работе В.Е. Хаина и К.Б. Сеславинского затрагивались не только проявления тектонических деформаций, но и процессы магматизма и регионального метаморфизма. Они также обнаруживают периодические усиления и ослабления интенсивности, которые, как уже подмечали многие исследователи, сначала Г. Гастил (Gastil, 1960) и М.М. Рубинштейн (1967), позже И.А. Загрузина (1991) и Ю.Д. Пушкарев (1990), находят свое четкое отражение на гистограммах радиометрических датировок. Применительно к офиолитам и метаморфитам низких температур и высоких давлений об этом писали Н.А. Богданов и Н.Л. Добрецов (1987).

Формирование гранитных батолитов - особенно наглядное свидетельство сочетания непрерывности и прерывистости процесса. С одной стороны, пример многих крупных батолитов, таких, как батолит Береговых хребтов Британской

Колумбии, Береговой батолит Перу, Баргузинский на юге Сибири, показывает, что их формирование - процесс весьма длительный, охватывающий десятки, нередко более сотни миллионов лет. С другой стороны, это формирование было многофазным, т.е. дискретным, и в нем были отдельные пики, которые, в частности для батолитов Северо-Американских Кордильер, совпадают с основными эпохами деформаций сжатия — невадской, севиерской, ларамийской.

Итак, напрашивается вывод, что между эволюционизмом и катастрофизмом, градуализмом и пунктуализмом нет никаких противоречий. Геологическая среда развивается непрерывно-прерывисто, как было отмечено уже М.И. Баренцевым (1939) и одним из авторов этой книги (Хаин, 1950, 1971). Геологические катастрофы, в частности, представляют собой вполне естественное явление, и в них не надо видеть отражение неких религиозных, мистических представлений. Кстати, не было их и у такого основоположника катастрофизма, как Ж. Кювье. Недооценка роли скачков, катастрофических явлений делает более плоским наше видение геологической истории, сводя его к скучному униформизму.

Это заключение полностью относится и к истории органического мира. Представление о том, что резкие изменения в составе ископаемой фауны и флоры на стратиграфических рубежах связаны с неполнотой геологической летописи, с перерывами в накоплении осадков, опровергнуто дальнейшими исследованиями. Достаточно сослаться на изучение непрерывных разрезов переходных от мела к палеогену слоев и ряда других, заставивших выдвинуть альтернативную концепцию «великих вымираний». Эта концепция полностью реабилитирует взгляды Ж. Кювье на значение катастроф, или, как он их называл, революций в истории земного шара.

В заключение данного раздела упомянем еще о некоторых материалах, подтверждающих сделанные нами выводы. Это касается, в частности, результатов детального изучения активных окраин Тихого океана, обнаруживших и на западе (Курилы, Япония), и на востоке (Центральная и Южная Америка) чередование фаз наращивания аккреционных призм и эрозии этих окраин, свидетельствующее о непрерывно-прерывистом процессе их развития. То же относится и к истории формирования крупных гранитных батолитов.

И, тем не менее, дискуссия по данной проблеме не закончена, о чем может свидетельствовать полемика австралийских геологов по поводу характера развития Лахланской ранне- и среднепалеозойской складчатой системы. В работах одних исследователей (Gray et. al., 1997) доказывается непрерывность и постепенность деформационного процесса в интервале 460-380 млн. лет т.н. в связи с функционированием зон субдукции вдоль восточной окраины будущего орогена, в то время как другие исследователи (Van den Berg, 1999) указывают на эпизодичность этих деформаций, выделяя фазы на уровне 455, 440, 425 и 380 млн. лет т.н. и отрицая непрерывность субдукции. При этом в качестве основного источника информации используются данные определения $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраста мусковита, развивающегося вдоль поверхностей кливажа и в кварцевых жилах.

Эпизодичность орогенеза нашла подтверждение и в работе М. Элисона (Elison, 1991), в которой рассмотрена история деформаций сжатия, сформировавших складчато-надвиговую структуру восточной мегазоны и форланда Северо-Американских Кордильер в период между средней юрой и эоценом, т.е. на протяжении 110 млн лет. Согласно проведенному исследованию, хотя деформации и протекали в общем непрерывно, в их развитии наблюдалось чередование импульсов повышенной скорости сжатия, длительностью от 10 до 30 млн лет. Их сопоставление с перемещениями литосферных плит на западной границе Северо-Американской плиты показало, что между ними существует определенная, хотя и не прямая, корреляция. Интерес, который представляют эти выводы, очевиден.

1.7. направленность и цикличность в эволюции земли

На протяжении всех почти 4,6 млрд. лет своей истории наша планета и происходившие в ее недрах и на поверхности геологические процессы, несомненно, испытывали значительные изменения. В их основе лежало изменение физических и астрономических параметров, определяющих течение геологических процессов. Из астрономических параметров наиболее значение имело удаление Луны от Земли с уменьшением амплитуды твердых приливов, замедление осевого вращения Земли с соответственным увеличением продолжительности суток и наклона оси вращения, а также увеличение светимости Солнца и, следовательно, инсоляции земной поверхности.

Однако роль изменений, связанных с недрами планеты, была неизмеримо выше. Здесь на первое место выходит уменьшение глубинного теплового потока, оцениваемое по сравнению с археем в 3-4 раза. Это вековое охлаждение Земли связано с истощением основных источников ее разогрева - тепла, во-первых, приобретенного Землей в ходе аккреции; во-вторых, выделявшегося при образовании ядра и продолжавшего выделяться в процессе дифференциации на оболочки, включая формирование внутреннего ядра за счет кристаллизации вещества внешнего ядра; в-третьих, производимое твердыми лунно-солнечными приливами и, наконец, в-четвертых, продуцируемого распадом естественно-радиоактивных элементов и изотопов. Одновременно с выделением тепла из глубоких недр Земли происходит их дегазация, точнее, дефлюидизация, масштабы которой, несомненно, также уменьшались в истории Земли, судя, в частности, по степени развития процессов гранито- и пегматитообразования, а равно метаморфизма и метасоматизма, наиболее интенсивно проявлявшихся в раннем докембрии.

В противоположность деградации эндогенной энергии Земли возрастала роль энергии, производимой в ходе развития биосферы. Наблюдалось увеличение как общего объема биомассы на поверхности Земли, так и ее энергетического потен-

циала, а также проникновение жизни в глубины океанов, в недра Земли и в верхние слои атмосферы. Благодаря субдукции, происходящей на Земле уже 3,5 млрд. лет, если не более, продукты жизнедеятельности организмов, и, прежде всего, органический углерод, могли затягиваться вглубь мантии Земли по меньшей мере до границы между верхней и нижней мантией (670 км), а, возможно, и вплоть до границы ядра, и затем участвовать в обратном подъеме (адвекции) флюидов с этих глубин. Кульминация воздействия живой материи на геологические процессы - это, конечно, геологическая деятельность человека, расширившего диапазон своего проникновения в глубины твердых недр и океана до 11-12 км и в космос до дальних пределов Солнечной системы.

Важнейшим аспектом геологической (геодинамической) эволюции Земли является, несомненно, ее прогрессирующее расслоение на оболочки. Даже с позиций гипотезы гомогенной аккреции это расслоение должно было начаться очень рано, или непосредственно на стадии самой аккреции, или немедленно вслед за

Его первым шагом должны были быть разделение твердой Земли на ядро и мантию и образование первичной атмосферы, завершившееся уже на первой, постаккреционной стадии развития Земли. В эту же стадию, вероятно во вторую ее половину, началась кристаллизация существовавшего в первые сотни миллионов лет истории Земли у ее поверхности магматического океана (или мощной, частично расплавленной протоастеносферы), с образованием первичной, предположительно базальтово-коматиитовой (и, возможно, габбро-анортозитовой) коры Земли. На следующей, раннеархейской (4-3,5 млрд. лет т.н.) стадии эта кора была преобразована гранитизацией через плавление и метасоматизм в протоконтинентальную, с возникновением островов протосиала - протоконтинентов. На этой же стадии Земля обрела еще две наружные оболочки - гидросферу, образовавшуюся за счет конденсации водяных паров первичной атмосферы после того, как температура земной поверхности снизилась до соответствующей величины, и биосферу.

Развитие плиотектонических процессов - спрединга и субдукции - на третьей, средне- и позднеархейской стадии (3,5-(3)-2,5 млрд. лет т.н.), с последовательным образованием множества вулканических дуг в зеленокаменных поясах и их аккрецией к островным ядрам серогнейсового протосиала, привело, в конечном счете, к формированию уже сплошного и протяженного слоя зрелой коры мощностью порядка 35—40 км (Борукаев, 1990). При этом, как показал Г. Мартен (Martin, 1986), гранитообразование в архейских зонах субдукции благодаря более высокому геотермическому градиенту отличалось от более позднего тем, что гранитная магма являлась продуктом непосредственного плавления субдуцируемой океанической коры, а не находящегося над нею клина верхней мантии нависающей плиты под влиянием дегидратации этой коры. Этим, по мнению Г. Мартена, объясняются определенные химические отличия архейских и более молодых гранитов. Развитие процессов метаморфизма и анатектического

гранитообразования в нижней части образовавшейся к концу архея мощной коры повлекло за собой ее разделение на два слоя различного состава (гранулит-базитовый и гранито-гнейсовый) и разных геологических свойств. В свою очередь, образование гранито-гнейсового слоя, представленного, в частности, плоскими гранитными батолитами зеленокаменных поясов, способствовало консолидации и стабилизации гранит-зеленокаменных областей, т.е. превращению их в кратоны. Появление алмазонасных кимберлитовых трубок в конце архея показывает, что континентальная литосфера одновременно должна была достигнуть мощности порядка 150-200 км (De Wit et al., 1992). Ниже обособилась астеносфера, в какой-то мере представлявшая собой реликт доархейского магматического океана (протоастеносферы).

На рубеже архея и протерозоя (2,5 млрд. лет т.н.), вероятно, впервые произошло обособление твердого внутреннего ядра Земли, продолжавшего затем разрастаться за счет железа и никеля жидкого внешнего ядра.

Таким образом, к началу протерозоя все основные оболочки Земли: внутреннее и внешнее ядро, мантия, кора с ее двумя слоями, гидросфера, биосфера и атмосфера — были уже сформированы, но их эволюция на этом не закончилась. В течение раннего протерозоя в зонах спрединга продолжала рождаться новая океанская кора, а в зонах субдукции за счет ее преобразования возникала новая континентальная кора, наращивавшая ранее образованные континентальные массивы. В итоге до 60-80% современной континентальной коры было уже образовано к концу раннего протерозоя, к 1,65 млрд. лет т.н. Этот процесс аккреции континентальной коры продолжался в среднем и позднем протерозое и в фанерозое, но уже в замедленном темпе и в значительной степени за счет рециклинга более ранней континентальной коры - эрозии ее поверхности, сноса обломочного материала в океан суши, его переработки и «регенерации» в зонах субдукции, куда поступал материал подошвенной эрозии континентальной коры в самих этих зо-

Одновременно продолжалось обеднение верхней мантии некогерентными, литофильными элементами, уходившими в кору вместе с базальтовой магмой, и тем самым усиливались некоторые химические различия между деплетированной, особенно под архейскими континентами, верхней мантией и недеплетированной, первично несколько обогащенной этими элементами нижней мантией. Однако значительная часть литофильных элементов возвращалась в мантию, в ее базальный слой, в процессе субдукции, снова поднимаясь к поверхности Земли в составе мантийных струй - плюмов.

Как показано в работе (Durrheim, Mooney, 1991), судя по распределению сейсмических скоростей, обнаруживаются существенные различия в мощности и составе архейской и протерозойской континентальной коры. Архейская кора, в среднем, менее мощная - 35 км, протерозойская более мощная - 45 км, причем в ее низах выделяется слой повышенных скоростей - более 7 км/с. Этот слой рассматривается как возникший в результате накопления базальтовой магмы в осно-

вании коры. Возможность его образования связывается с выделением из менее истощенной мантии, по сравнению с архейской, интенсивно деплетированной при образовании коматиитов.

Эта гипотеза одновременно помогает понять подмеченную К. Конди (Condie, 1989) большую обогащенность нижнепротерозойских базальтов некогерентными элементами, чем архейских, на первый взгляд представляющуюся парадоксальной. Впрочем, возможно и другое предположение - вовлечение в плавление более глубоких и поэтому менее истощенных горизонтов мантии. Этим можно было бы объяснить и тот факт, что только в конце архея появляются породы щелочно-базальтовой ассоциации типа пород современных океанских островов.

Гидросфера, вероятно, достигла объема, близкого к современному, уже к началу фанерозоя, если не раньше, в протерозое, поскольку рост ее объема должен был коррелироваться с темпом роста коры за счет магматизма. Но все же она и позже продолжала пополняться за счет дегазации мантии, происходившей в ходе вулканической деятельности. Та же дегазация должна была приводить и к увеличению объема атмосферы, а ее состав претерпел коренное изменение в середине раннего протерозоя благодаря взаимодействию с биосферой - появился свободный кислород, и атмосфера окончательно сменила свой первичный восстановительный характер на окислительный. Между тем продолжалась экспансия биосферы, первоначально занимавшей лишь самую верхнюю часть водной оболочки Земли. Она распространилась и в глубины океана, и на просторы суши в виде наземных флоры и фауны. По существу, завоевание человеком атмосферы, океана, земных недр и Космоса - это дальнейшее проявление той же экспансии биосферы, частично переродившейся с появлением человека в ноосферу.

В общем можно констатировать, что замедлению темпов дифференциации глубоких недр Земли от архея к протерозою и от протерозоя к фанерозою противостояло ускорение темпов дифференциации самых внешних оболочек Земли.

Параллельно с прогрессирующей дифференциацией Земли на оболочки шел процесс усложнения их петрографического и минералогического состава. Этот процесс сочетается с усложнением этого состава по вертикали, от более глубоких оболочек твердой Земли к наружным, от нижней мантии к верхней, к коре и особенно к осадочной оболочке, коре выветривания и почвам.

Нижняя мантия сложена, в основном, двумя просто построенными минералами: перовскитом $(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{SiO}_3$ и магнезиовюститом $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{O}$. В низах верхней мантии появляются оливин (со структурой шпинели), гранаты, далее пироксены, плагиоклазы, а выше - минералы, очевидно образованные за счет вещества, затянутого в эти глубины субдукцией - флогопит, алмаз, коэсит, стишовит. В коре минеральное разнообразие весьма значительно возрастает, прежде всего за счет полевых шпатов, амфиболов, слюд, кварца, а также таких алюмосиликатов, как кианит, силлиманит, ставролит и других метаморфических минералов. В осадочной оболочке коры это разнообразие пополняется карбонатами, сульфатами, хлоридами. Сложность строения достигает своего максимума в слоевых силикатах

- слюдах, а также в минералах группы глини и кор выветривания. Это усложнение минерального состава примерно отвечает и исторической последовательности возникновения отдельных минеральных видов, связанной с увеличением разнообразия магматических пород. Среди последних наиболее ранние и вместе с тем «сквозные» образования, притом общие для всех планет земной группы и Луны - толеитовые базальты. Вместе с ними появляются и продукты более полного плавления верхней мантии - коматиты, пикриты. В составе всех этих пород уже присутствуют плагиоклазы, пироксены, оливин. Появляющиеся в раннем архее тоналиты и родственные им гранитоиды приносят с собой кислые плагиоклазы и кварц. В позднем архее с массовым появлением калиевых гранитоидов в составе земной коры большую роль начинают играть калиевые и калинатровые полевые шпаты, а также слюды. В конце архея (2,8 млрд. лет т.н.) становятся известными щелочные интрузивные породы, в частности нефелиновые сиениты с их фельдшпатоидами. Тогда же появляются континентальные платобазальты и дайки долеритов и габбро-долеритов. В раннем протерозое встречается уже почти все существующее позднее разнообразие магматических пород, интрузивных и излившихся. Своеобразные граниты рапакиви с их овоидами калиевого полевого шпата, характерные для среднего протерозоя, представляют собой редкий пример «вымерших» затем магматических пород.

Эволюция гранитообразования вообще заслуживает особого внимания. Первые, ранне- и среднеархейские гранитоиды тоналит-трондьемит-гранодиоритового состава - «серые гнейсы» - возникли в итоге массового переплавления первичной базальтовой коры в процессе субдукции, «сагдукции» (прямого погружения в астеносферу) или обдукции, сопровождаемых метасоматизмом. Их стронциевая и неодимовая изотопная маркировка свидетельствует об образовании за счет материала, лишь недавно выплавленного из мантии, т.е. о принадлежности к типу I. Вторая, позднеархейская генерация гранитоидов, теперь уже нормальных, калиевых, имеет анатектическое происхождение, представляя собой результат селективного плавления нижней коры, испытывавшей гранулитовый метаморфизм и дегранитизацию. Иначе говоря, это первые граниты типа S. Раннепротерозойские гранитоиды принадлежали уже к обоим типам: в энсиматических складчатых системах они имеют субдукционное происхождение и относятся к типу I (в частности, крупные батолиты в системах Уопмей, Трансгудзонской и Лабрадорской Канадского щита); в энсиалических, интракратонных системах (в частности австралийских) - к типу S.

В конце раннего и в среднем протерозое отмечается первое массовое появление анорогенных гранитоидов типа A (одиночные плутоны этого типа известны уже с конца архея), нередко входящих вместе с габброанортозитами в состав крупных расслоенных плутонов. Наиболее правдоподобное объяснение их происхождения состоит во взаимодействии базальтовых мантийных выплавок, скапливающихся в основании коры суперконтинента (англ. название явления - *underplating*), с сиалическим материалом этой коры.

Начиная с позднего протерозоя, когда тектоника плит «заработала» в полную силу, в окраинно-континентальных подвижных поясах преобладало образование субдукционных гранитоидов типа I, в краевых вулканоплутонических поясах андского типа - с некоторым участием контаминации сиалической коры, а в межконтинентальных, коллизионных, - гранитоидов типа S - продуктов плавления либо нижней коры, либо осадочных песчано-глинистых толщ. Вместе с тем, в далеком тылу вулканоплутонических поясов получают распространение анорогенные гранитоиды типа A, ярким примером которых являются позднемезозойские гранитоиды Восточного Китая и одновозрастные им интрузии Алданского щита, а также ларамийские гранитоиды Скалистых гор США и Восточной Сьерры-Мадре Мексики.

Эволюционные изменения касаются и состава метаморфических пород. Уже в раннем архее встречаются породы амфиболитовой фации, прежде всего различные гнейсы, а в среднем-позднем архее присутствует вся разнотемпературная гамма метаморфитов низкого и умеренного давления, от зеленосланцевой до гранулитовой фации с ее чарнокитами и эндербитами. В раннем протерозое появляются метаморфиты высокого давления - эклогиты, а в позднем протерозое получают распространение метаморфические породы высокого давления и низкой температуры - «голубые сланцы» с глаукофаном, кросситом, лавсонитом. Впрочем, есть некоторые указания на их присутствие уже в нижнем протерозое, например в Китае. В общем же с позднего протерозоя встречается весь набор метаморфических пород различных ступеней и фаций. Но можно отметить, что удельный вес высокотемпературных разностей постепенно снижается, очевидно, за счет снижения теплового потока. Однако это впечатление может быть усилено эффектом меньшего глубинного среза.

Эволюционные изменения в стиле тектонических деформаций оказались меньшими, чем это еще недавно предполагалось. В архее, включая нижнеархейские образования, в последние годы были установлены столь же сложные покровно-надвиговые дислокации, что и в молодых альпийских подвижных системах. Определенная специфика докембрийской тектоники заключается, пожалуй, лишь в широком развитии гранито-гнейсовых куполов, которые, впрочем, распространены и в фанерозое (Канадские Кордильеры, Забайкалье, Камчатка). Гранитовые диапиры были широко распространены уже в архее, а глиняные и соляные - начиная с позднего протерозоя (Австралия). Проявления грязевого вулканизма, обычно сопутствующего глиняному диапиризму, известны с позднего палеозоя и мезозоя.

Благодаря неоднократному изменению числа и расположения литосферных плит и их границ, а также характера взаимодействия между ними и соответствующему изменению полей напряжения структурный план земной коры и литосферы непрерывно усложнялся, и возникала дисгармония между структурами разных уровней, с проявлением горизонтальных срывов между отдельными слоями литосферы.

К числу важнейших сторон эволюции Земли относится, несомненно, изменение в динамике тектоносферы (литосфера+астеносфера) и в определяющем ее конвективном режиме мантии.

Как уже указывалось, постаккреционное развитие Земли началось с образования непосредственно у ее поверхности или близ нее магматического океана или сильно подплавленной протоастеносферы. Разогреву верхней мантии в это время значительно способствовали интенсивные твердые приливы, вызываемые еще очень близкой Луной. После образования из верхней части магматического океана или протоастеносферы первичной твердой коры Земли, ниже обособилась астеносфера, в которой протекала энергичная, но еще хаотическая конвекция. В интервале 4,2-3,9 млрд. лет т.н. Земля подвергалась интенсивной метеоритной бомбардировке, реакцией на которую были образование восходящих мантийных струй-плюмов и излияния базальтов, а в дальнейшем, в раннем архее, их преобразование в тоналитовые «серые гнейсы», вероятно в пределах кольцевых структур, с возникновением островов протоконтинентальной коры - протосиаля. На этом, очевидно, закончилась доплитотектоническая стадия развития Земли, с господством хаотической конвекции и режима мантийных струй-плюмов.

Возможно, в среднем и определенно в позднем архее плюм-текtonика сочетается с плейт-текtonикой. В процессе рифтинга и позже спрединга, сначала рассеянного, затем сосредоточенного, образуются многочисленные зеленокаменные пояса, а в их пределах - вулканические дуги над зонами субдукции. Соответственно можно думать, что конвекция в мантии приняла более упорядоченный характер. Она должна была быть мелкочаистой, причем это относится к верхней мантии, а в нижней мантии могла действовать своя, отличная форма конвекции. Как говорилось выше, архейскую тектонику плит можно обозначить как эмбриональную, или тектонику многочисленных мелких плит (мультиплитную). Скорость спрединга могла быть выше современной (хотя это и оспаривается), а средний возраст субдуцируемых плит меньше - 20 млн. лет против 60 млн. лет в современную эпоху (Abbott, Hoffman, 1984), хотя существует и несколько иное представление. Соответственно, наклон зон субдукции был более пологим, мощность же океанской коры была большей за счет более интенсивного плавления сильнее разогретой мантии (Abbott, Drury, 1994).

К концу архея аккреция вулканических дуг зеленокаменных поясов к островам протосиаля и коллизия разросшихся таким образом литосферных плит - гранит-зеленокаменных областей - привели к образованию первого суперконтинента - Пангеи 0. Мантийная конвекция в период существования этого суперконтинента, охватывающий самый конец архея и первую половину раннего протерозоя, должна была испытать значительную перестройку - она стала общемантийной и одноячейковой. В дальнейшем, во вторую половину раннего протерозоя, это повлекло за собой распад первой Пангеи на целый ряд малых литосферных плит, более крупных, чем архейские, но более мелких, чем фанерозойские. Наступила эра тектоники малых плит. Оси спрединга, ограничивающие раннепро-

терозойские плиты, составляют характерную полигональную, близкую к гексагональной, решетку, что свидетельствует о проявлении в мантии многоячейстой конвекции типа Рэлея-Бенара, снова отдельно существующей в верхней и нижней мантии.

Одновременно с первой Пангеей на другой стороне Земли должна была образоваться Панталасса, реликтом которой условно может считаться мезозойско-кайнозойский Тихий океан, хотя конфигурация Панталассы неоднократно менялась в течение протерозоя и фанерозоя.

В конце раннего протерозоя произошли воссоздание Пангеи - образовалась Пангея I - й новая смена типа конвекции на общемантийную и одначейковую. Пангея I продолжала существовать в первую половину среднего протерозоя, а затем процесс мог повториться с ее распадом и восстановлением в конце зона, в гренвилевскую тектономагматическую эпоху, примерно 1 млрд. лет т.н. Далее, в позднем протерозое и раннем палеозое, опять последовала деструкция Пангеи, с обособлением мегаконтинента Гондваны и континентов-кратонов северной, лавразийской группы - и раскрытием разделяющих их океанов.

В позднем палеозое - раннем мезозое за счет нового объединения сиалических массивов опять возникла Пангея - та самая, существование которой было впервые доказано А. Вегенером. Поздний мезозой и кайнозой явились временем распада вегенеровской Пангеи и становления современного плана разделения литосферы на крупные и средние плиты. Но современный стиль тектоники литосферных плит установился еще раньше - в позднем протерозое.

Таким образом, тектоника плит прошла в своей эволюции три фазы: архейскую (AR, 3) - эмбриональной тектоники мелких плит; ранне- и (вероятно) среднепротерозойскую - тектоники малых плит; и, наконец, позднепротерозойско-фанерозойскую полномасштабной тектоники плит. Соответствующие изменения должен был претерпеть и конвективный режим мантии - от хаотической конвекции через мелкаячейковую двухъярусную к одначейковой общемантийной в период существования и распада Пангей.

Но периодическое становление и распад Пангей, а также изменение режима конвекции показывают, что на эту общую направленность развития Земли накладывается определенная цикличность. Эта крупная цикличность - мегацикличность, имеет период порядка 400-500 млн. лет. Поскольку распад Пангеи означает одновременно раскрытие вторичных океанов - Атлантического, Индийского, Арктического, Средиземного и их предшественников, а возрождение единого материка - закрытие этих океанов и соответственно расширение первичного океана с его превращением в Панталассу, эти мегациклы можно было отождествить с циклами, названными в честь канадского геофизика Дж.Т. Вилсона, впервые их установившего на примере повторного закрытия и раскрытия Атлантики (Хаин, 1992).

Становление Пангей обязано, очевидно, усилению восходящего мантийного потока в центре Панталассы, который как бы разгоняет окружающие ее конти-

ненты и толкает их через зоны субдукции навстречу друг другу, и отмиранию подобных мантийных течений и связанных с ними осей спрединга во вторичных океанах, что приводит к их «захлопыванию». Это означает переход от двух- или многоячейковой структуры мантийной конвекции к одноячейковой.

Причиной относительной недолговечности и неминуемого распада суперконтинентов служит, по мнению многих исследователей (начиная, по-видимому, с Д. Андерсона (Anderson, 1982)), накопление мантийного тепла под их толстой и протяженной корой и литосферой. Оно порождает сначала поднятие поверхности суперконтинента, затем его раскалывание континентальными рифтами, сопровождаемое активностью плюмов и излияниями платобазальтов, далее переход рифтинга в спрединг с образованием «малых» океанских бассейнов красно-морского типа, а позже и настоящих океанов атлантического типа. Расчленение суперконтинента многочисленными осями спрединга означает возврат к многоячейковой структуре мантийной конвекции и усиление выделения мантийного тепла с охлаждением мантии в области бывшего суперконтинента. Соответственно тепловой поток в океанском полушарии Земли начинает доминировать, что в конечном итоге приводит к повторению цикла Вилсона.

Палинспастические реконструкции двух последних Пангей по палеомагнитным данным показали, что «сборка» отдельных континентов в единый суперконтинент и его обратная «разборка» проходили по сходному плану и, следовательно, вполне закономерно (Le Pichon, Nuchon, 1984; Piper, Grant, 1989).

Мегацикличность лежит в основе наиболее долгопериодических колебаний уровня Мирового океана и глобального климата. В частности, с ней согласуется распределение во времени ледниковых периодов. Мегацикличность определяет вообще и крупномасштабные изменения климата на Земле, поскольку вызывает усиление (в эпохи существования суперконтинента и низких уровней океана) циркуляции в Мировом океане или ее ослабление (в эпохи распада суперконтинента и высокого уровня океана).

В свою очередь, все эти изменения отражаются на разнообразии и обилии органической жизни: эпохи распада суперконтинентов благоприятствуют взрывам ее разнообразия, как в венде и раннем кембрии. В эндогенной жизни Земли мегацикличность выражается в периодическом повышении интенсивности гранитообразования и регионального метаморфизма, фиксируемой статистикой изотопных датировок соответствующих пород. Согласно сводке Ю.Д. Пушкарева (1989), пики на гистограммах таких датировок отвечают рубежам 2,5; 1,65; 0,24 млрд. лет т.н. Словом, мегацикличность - важнейшее проявление ритма Земли (Nance et al., 1988).

Наряду с мегацикличностью, в истории Земли происходили периодические изменения и более высоких порядков. Следующую по масштабу цикличность, порядка 150-200 млн. лет, В.Е. Хаин назвал в честь ее первооткрывателя, французского геолога М. Бертрана (Хаин, 1992). Он установил ее в конце XIX в. по повторяемости в разрезе разновозрастных складчатых систем Западной Европы

и Северной Америки одной и той же последовательности осадочных формаций: сланцевой, флишевой, молассовой. Он выделил четыре цикла - гуронский, каледонский, герцинский, альпийский. Из них в литературе фигурируют три последних, дополненные, правда, еще одним циклом - киммерийским, проявившемся в мезозое; гуронский же цикл Н.С. Шатский заменил байкальским (ассинтским Г. Штилле).

Циклы Бертрана, как правило, приводят не к полному закрытию океанов атлантического типа, а лишь к частичному превращению их периферических частей или отдельных сегментов в складчатые (точнее складчато-покровные) горные сооружения. Так, в конце герцинского цикла западная часть палеозойского Тетиса испытала интенсивные тектонические деформации, метаморфизм и гранитизацию и превратилась в горную сушу вследствие столкновения Западной Гондваны с Северной Америкой. В то же время в более восточной части Палеотетиса этими процессами была затронута лишь его северная периферия. Развитие Тетиса в целом, подобно развитию других океанов атлантического типа отвечающее циклу Вилсона, включало несколько (два-четыре) циклов Бертрана. Палеозиатский океан, разделявший Восточно-Европейский, Сибирский, Таримский и Китайско-Корейский континенты, прежде чем окончательно замкнуться, пережил байкальский, каледонский, герцинский и киммерийские циклы Бертрана. В Тихоокеанском полушарии Земли повторное проявление циклов Бертрана затрагивало лишь периферию Тихого океана - Круготихоокеанский подвижный пояс, да и то каждый раз лишь частично.

Циклы Бертрана находят свое подтверждение в трансгрессивно-регрессивной цикличности, в периодических изменениях интенсивности островодужного вулканизма, гранитообразования и регионального метаморфизма, выявленных на полуколичественной основе В.Е. Хаиным и К.Б. Сеславинским (Хаин, Сеславинский, 1991).

Циклы Бертрана, в свою очередь, слагаются из серии циклов меньшей длительности. Их кульминации отмечены орогеническими фазами, когда происходило усиление складчато-надвиговых деформаций. Эти циклы опять-таки совпадали с периодичностью изменения интенсивности тектонических деформаций, островодужного вулканизма, гранитообразования и регионального метаморфизма, установленной К.Б. Сеславинским и автором книги. Они отвечают также циклам второго порядка колебаний уровня Мирового океана на известной кривой П. Вэйла (Vail et al., 1977).

Длительность этих циклов, которые были предложено назвать циклами Штилле, определена в 30 млн. лет. Таким образом, цикл Бертрана должен включать четыре цикла Штилле. Эта периодичность близка к той, которая устанавливается для великих вымираний и обновлений фауны, в свою очередь, связанных, с одной стороны, с крупными трансгрессиями и регрессиями, а с другой - с усилениями бомбардировки Земли крупными метеоритами и (или) кометами.

Говоря об орогенических фазах Штилле, следует отметить, что наше понимание значения этих фаз существенно отличается от первоначальной оценки его самим Г. Штилле. Мы признаем непрерывность проявления тектонических, в том числе складко- и надвигообразующих, движений и деформаций в течение всей истории Земли, и под тектоническими эпохами и фазами подразумеваем лишь интервалы времени, отвечающие заметному усилению их интенсивности и существенным перестройкам структурного плана складчатых систем, а значит, и литосферных плит. Длительность фаз может составлять первые миллионы лет, и их кульминации могут не вполне совпадать даже в разных частях одного того же орогена; время их проявления, в глобальном масштабе, может быть определено лишь чисто статистически. Наконец, далеко не обязательно повсеместное проявление каждой из выделенных глобальных эпох и фаз; возможность и степень такого проявления зависят от региональной геодинамической обстановки.

Цикличность следующего порядка - 3-5 млн. лет - наиболее ярко выражена в ярусности глобальной стратиграфической шкалы фанерозоя и, несомненно, была неосознанной эмпирической основой при разработке этой шкалы. На уже упоминавшейся кривой Вэйла эвстатических колебаний уровня океана данной цикличности соответствуют циклы третьего порядка.

Далее идет уровень периодичности, установленный М. Миланковичем и успешно использованный им для объяснения чередования ледниковых и межледниковых эпох. По современным данным (Berger et al, 1989), это циклы длительностью 400 и 100 тыс. лет для изменений эксцентриситета земной орбиты, 41 тыс. лет - для изменений наклона оси вращения Земли, 23 и 19 тыс. лет - для прецессий. Отражение этой цикличности наблюдается также в изменениях литологии и мощности внеледниковых отложений, в частности в изменениях содержания карбоната кальция и органического углерода. Было даже предложено считать цикл в 20 тыс. лет климатостратиграфической единицей изменений и называть ее гилбертом (Dercourt et al., 1986).

Но наиболее ярко цикличность этих порядков - п (10^4 - 10^5) лет - выражена в паралических угленосных толщах, где она, например, в верхнем палеозое, напрямую отражает колебания уровня океана, связанные с чередованием ледниковых и межледниковых эпох, а также в толщах эвапоритов, где она тоже обусловлена крупными колебаниями климатических условий, а именно влажности. В частности, это циклы порядка 400 тыс. лет.

Несомненно, существуют проявления периодичности еще более высокого порядка, вплоть до годичной (сезонной) ритмичности ленточных глин. К ним относится, в частности, цикличность строения флишевых формаций, впервые выявленная Н.Б. Вассоевичем, а затем описанная голландским ученым Х. Боумой. Длительность накопления флишевых циклитов оценивается в 1-2 тыс. лет (Афанасьев, 1993). Соответственно циклы такого порядка можно было бы назвать циклами Вассоевича.

Еще более короткопериодичности цикличность была названа С.Л. Афанасьевым наноцикличностью. Он посвятил изучению цикличности геологических процессов многие годы своей деятельности. С.Л. Афанасьев различает циклы следующей длительности: 452, 109, 88, 31, 9 лет, и приводит данные, подтверждающие существование этой цикличности. Эти данные включают климатические колебания, изменения продолжительности суток, т.е. скорости вращения Земли, сейсмической активности, солнечной активности, колебаний уровней океана и озер, мощности озерных отложений и др. Добавим к этому, что наблюдения последних десятилетий обнаружили также определенную периодичность вулканических извержений, наземных и подводных. С.Л. Афанасьев полагает, что в основе наноцикличности лежат воздействия Луны и Солнца, периодичность затмений и прохождения Землей перигелия. Другие исследователи указывают на существование корреляции с 11- и 22-летними циклами солнечной активности.

С.Л. Афанасьев (1978) выделил в общем 17 порядков циклов, из которых отмеченным выше наноциклам соответствует №14-17, а №17 отвечает годичной (сезонной) цикличности. Циклы первого порядка имеют периодичность 4370 млн. лет и охватывают почти всю историю Земли, до начала юрского периода. Циклы второго порядка, средней продолжительностью 1456 млн. лет., соответствуют выделенным Г. Штилле, В.В. Меннером и Н.А. Штрейсом, Дж. Саттоном, Ч.В. Борукаевым крупным этапам геологической истории Земли (протогей, дейтерогей, неогей у Г. Штилле); их можно назвать гигациклами. Циклы третьего порядка (класса по С.Л. Афанасьеву) - это и есть мегациклы Вилсона, охарактеризованные выше. В более поздних публикациях С.Л. Афанасьев (1998) удвоил их числа.

В основе цикличности лежит резонанс между глубинными процессами и внешними, космическими воздействиями на Землю. При этом в долгопериодических циклах на первый план выступают внутренние, эндогенные факторы, а в короткопериодических - внешние, космогенные.

Развитие Земли в целом определяется алгебраическим суммированием двух главных составляющих. Первый, монотонный компонент отражает направленно-поступательную эволюцию Земли, обусловленную ее охлаждением и потерей флюидов. Она выражается, с одной стороны, в увеличении дифференцированное™ и сложности ее строения, а с другой - в снижении активности эндогенных процессов и соответственном возрастании относительной роли процессов экзогенных, к которым относятся и роль живого вещества, и деятельность человека в частности. Второй компонент является периодическим и состоит из многопорядковых колебаний интенсивности различных геологических процессов, отраженных в циклических изменениях геологической среды.

Первый компонент, вероятно, также связан с радиусом Земли, с ее сжатием, а второй - с пульсацией ее объема.

Учет монотонного и периодического компонентов геологического развития Земли имеет существенное методологическое значение. Необходима определен-

ная осторожность в использовании столь важного, практически для всех отраслей геологии, метода актуализма. Во-первых, чем дальше в геологическом времени отстоят изучаемые нами объекты и процессы от современной эпохи, тем вероятнее их отличия от современных аналогов. Правда, эти изменения геологических процессов протекали настолько медленно, что для последнего миллиарда лет их можно практически игнорировать, но для более раннего времени, и особенно начиная с границы протерозой/архей, их уже нельзя не принимать во внимание.

Во-вторых, следует непременно учитывать, а это касается фанерозоя, цикличность изменений геологической среды и протекающих в ней процессов. В частности, очень важно помнить, что мы живем в эпоху значительных климатических контрастов, в ледниковом периоде, хотя и во время межледниковья. Поэтому мы не можем проводить полную аналогию между современными процессами и процессами, протекавшими в эпохи, когда климатическая зональность на Земле

была менее резко выраженной, ледниковые шапки отсутствовали, циркуляция в океанах была не столь интенсивной и вообще обмен между океаном и атмосферой протекал существенно по-иному (Nance et al., 1988). Как показал недавно В.П. Петров (1991), только в условиях таких эпох на континентах могли формироваться мощные коры выветривания, которые в настоящее время не образуются.

Вместе с тем, следует предупредить исследователей, что пренебрежение методом актуализма может привести к еще большим ошибкам, чем его абсолютизация и некритическое применение. Приступая к изучению того или иного явления геологического прошлого, мы должны, прежде всего, искать его современные аналоги и, лишь убедившись в существовании определенных отличий, не объясняемых аналогиями с современными процессами, пытаться обнаружить причины таких отличий.

Характерный пример действенности метода актуализма, даже в отношении весьма отдаленного геологического прошлого, дает нам история применения концепции тектоники плит в отношении докембрия. Еще недавно большинство геологов были убеждены, что тектоника плит «заработала» на Земле лишь около 1 млрд. лет назад, в позднем протерозое. Позднее этот рубеж был отодвинут до границы протерозой/архей, а в настоящее время развитие коры и литосферы даже в глубоком архее очень многими рассматривается, и отнюдь не безуспешно, с позиций тектоники плит, хотя и отмечаются некоторые специфические особенности ее проявления (De Wit et al., 1992). У нас аналогичную позицию уже давно отстаивал Ч.Б. Борукаев (1990).

В этих публикациях были рассмотрены лишь наиболее крупные циклы Вилсона, Бертрана и Штилле, и была сделана попытка увязать их проявление с процессами конвекции на разных уровнях мантии. Было высказано предположение, что циклы Вилсона обязаны общемантийной конвекции, временами сменяющейся двухъярусной - раздельно в нижней и верхней мантии; циклы Бертрана объясняются конвекцией в верхах нижней мантии, а циклы Штилле - в астеносфере.

Эта тема была позднее развернута в совместной работе В.Е. Хаина и М.Н. Гончарова (2006).

К рассмотренной проблеме непосредственное отношение имеет работа Е.Е. Милановского (1996), в которой показана сопряженность орогенических фаз, фаз рифтинга, колебаний уровня океана, инверсий геомагнитного поля. Все эти изменения объясняются, по мнению Е.Е. Милановского, пульсациями объема Земли.

В работах Н.Л. Добрецова (1997, и других) особенно подчеркнуто значение цикличности порядка 30 млн. лет, отвечающий циклам Штилле автора. Ее Н.Л. Добрецов считает главной и обосновывает, в частности, распределением во времени офиолитов и метаморфитов низкой температуры - высоких давлений.

В зарубежной литературе последних лет главное внимание уделялось суперконтинентальным циклам, т.е. циклам Вильсона. В этих работах (Sheridan, 1997; Valzer, Hendel, 1997) так же предприняты попытки коррелировать с этими циклами (и циклами меньшей длительности) ряд других феноменов, включая колебания уровня океана, частоту инверсий геомагнитного поля, образование различных видов полезных ископаемых - металлических и осадочных, изменения в составе органического мира.

Особый интерес исследователей вызвала связь с эпохами распада суперконтинентов образования крупных дайковых роев и полей излияний платобазальтов - траппов, получивших в англоязычной литературе обозначение LIP - Large Igneous Provinces (Yale, Carpenter, 1998; Condie, 1998). Такая связь обнаруживается начиная с раннего протерозоя (распад эпиархейского суперконтинента Пангея 0) и особенно наглядно проявилась в период распада последней Пангеи. Так, раскрытию Центральной Атлантики предшествовало дайкообразование по обе ее стороны в начале юры (200-180 млн. лет т.н.), раскрытию Южного океана - образование траппов Дракенсберг в Южной Африке и Феррар в Антарктиде, Южной Атлантики - раннемеловых траппов Параны в Южной Америке и Этендека в Южной Африке, западной части Индийского океана - позднемеловых базальтов восточного Мадагаскара, Аравийского моря - траппов Декана на границе мела и палеогена, Северной Атлантики - раннепалеогеновых базальтов Брито-Арктической провинции. Имеются, правда, и видимые исключения - крупнейшая пермо-триасовая Тунгусская трапповая провинция в Сибири с продолжением под чехлом Западно-Сибирской плиты, но ее образование было связано с возникновением на севере Западной Сибири «Обского палеоокеана» (Аплонов, 1987), вернее, бассейна красноморского типа.

Исследователи, анализирувшие связь LIP с новообразованием океанов (Yale, Carpenter, 1998; Anderson, 1994; Courtillot et al., 1999; Dalziel et al., 2000), несколько по-разному трактуют ее механизм. Две крайние точки зрения таковы: 1) в основании суперконтинента, вследствие малой теплопроводности мощной континентальной литосферы, происходит разогрев астеносферы, и при возникновении в суперконтиненте разломов декомпрессия вдоль них приводит к магмооб-

разованию и подъему магмы к поверхности (Anderson, 1994, 2000); 2) первопричиной образования и последующего распада суперконтинента является подъем с мантийных глубин, начиная с границы ядра, мощного плюма (Dalziel et al., 2000). По мнению В.Е.Хаина, к которому блики и взгляды (Courtillot et al., 1999), более вероятен следующий сценарий: в основании суперконтинента действительно происходит разогрев астеносферы, приводящий к подъему поверхности суперконтинента, его раскалыванию, образованию рифтов, которые могут служить каналами для подъема магмы из растекающейся в основании литосферы вершины плюма. Зарождение плюма под центром суперконтинента может явиться следствием, по идее А.М. Никишина, образования по периферии суперконтинента уходящих под него зон субдукции.

Проблема суперконтинентальных циклов рассмотрена по-новому в работе Н.А.-Божко и Ю.В. Баркина (2002). Эти авторы определяют длительность таких циклов в 395 (400) млн. лет и выделяют в них собственно период существования суперконтинента продолжительностью в 160 млн. лет и промежуточные периоды, составляющие 237 млн. лет.

В рамках первых периодов различаются эпохи аггомации с преобладанием суши, эпиконтинентальными морями, низким уровнем моря, анорогенным магматизмом, холодным климатом, и эпохи распада суперконтинента (70 млн. лет) с проявлением континентального рифтогенеза, образованием расслоенных интрузий, уменьшением площади суши, потеплением климата. Первая половина межсуперконтинентальных периодов характеризуется, согласно указанным авторам, быстрым спредингом, его преобладанием над субдукцией, а вторая половина, напротив - замедленным спредингом и более активной субдукцией. В эти периоды наблюдается ускоренный рост коры на фоне общемантийной конвекции и активного действия плюмов, а во время существования суперконтинентов - проявлением двухслойной конвекции и в целом преобладанием тектоники плит, а в промежуточные периоды - плюм-тектоники.

Конкретно в истории Земли начиная с 4190 млн. лет т.н. Н.А. Божко выделяет 11 суперконтинентальных циклов, но оговаривается, что в известной геологической летописи могут быть установлены лишь 8 из них, с кульминациями на рубежах 3005, 2610, 2215, 1800, 1415, 1020, 625 и 230 млн. лет т.н. (легко видеть, что почти все эти рубежи совпадают с признаваемыми и другими исследователями). Указывается также, что от цикла к циклу, в соответствии с более ранними представлениями Н.А. Божко, происходит инверсия тенденций развития, центростремительных и центробежных, северного и южного полушарий Земли. Указано также на корреляцию межсуперконтинентальных периодов с галактическим годом.

В связи со сказанным выше следует остановиться на одном общем методологическом вопросе. В данной главе речь шла о двух основных закономерностях, определяющих эволюцию Земли - направленности и цикличности, которые могли бы быть изображены в виде прямой линии - «стрелы времени», по И. Приго-

жину, и синусоиды. Но существует и третья закономерность, а именно неравномерность развития (Хаин, 1964), которую в настоящее время уместно обозначить более строгим термином - нелинейность. Проявлению нелинейности в тектонических процессах в последние годы посвятил ряд работ Ю.М. Пущаровский (1999), о нелинейности применительно к металлогении писал А.Д. Щеглов, к геофизике — О.Л. Кузнецов. Действительно, нелинейность имеет важное значение, и ее нельзя игнорировать: практически все геологические процессы нелинейны, и это объясняется тем, что на их протекание одновременно воздействуют многие разнонаправленные факторы. Результатом является, в частности, неравномерность и диахронность проявления орогенических фаз, о чем шла речь выше, а также развития таких крупных структур, как орогены и целые океаны.

Необходимо, однако, отдавать себе отчет в том, что в иерархии закономерностей эволюции Земли нелинейность занимает третье место, а первое принадлежит направленности, второе - цикличности. Нелинейность лишь осложняет и затуманивает эти закономерности, но отнюдь их не отменяет и не подменяет.

1.8. современная структура коры и литосферы земли

В современной структуре верхней части твердой Земли приходится различать два уровня - коровый и литосферный. Литосферный план определяется разделением литосферы на плиты, разграниченные осями спрединга, совпадающими со срединно-океанскими хребтами, зонами субдукции вдоль глубоководных желобов или трансформными разломами. Положение как тех, так и других намечается по концентрации эпицентров землетрясений. Впервые картина современного распределения литосферных плит была намечена в 1968 г. К. Ле Пишоном и в основном нашла подтверждение в дальнейших океанологических и сейсмологических исследованиях, а также уточнение в моделях NUVEL-1 и NUVEL-1A. В последние годы она была еще больше уточнена альтиметрической спутниковой съемкой, а кинематика современных взаимных перемещений плит, первоначально установленная по новейшим полосовым магнитным аномалиям, прошла проверку и также подверглась уточнению методами космической геодезии - длиннотазовой интерферометрии, применением лазерных отражателей, а в самое последнее время - системы GPS. Все эти исследования в основном подтвердили модель NUVEL-1A, внося в нее лишь некоторые коррективы. Вместе с тем они показали, что внутри плит, в частности на примере Северо-Американского континента, существенных горизонтальных смещений не происходит, т.е. подтвердили их монолитность, за исключением крупных рифтовых систем (Восточная Африка) и краевых подвижных поясов (Северо-Американские Кордильеры).

Следует различать литосферные плиты трех порядков. Наиболее крупных из них - мегаплит - насчитывается семь: это Северо-Американская, Евразийская, Южно-Американская, Африканская, Индо-Австралийская, Антарктическая и Тихоокеанская. Самостоятельность этих плит не вызывает сомнений, но их границы не везде являются четкими. Это касается, в частности, границы между Северо- и Южно-Американскими плитами между Антильской зоной субдукции и противоположащим отрезком Срединно-Атлантического хребта, между Евразийской и Африканской плитами на участке между Азорскими островами и Гибралтаром и морем Альборан, и особенно - между Евразийской и Северо-Американской плитами в пределах Северо-Востока России и прилегающих морей. Весьма сложной выглядит, при детальном рассмотрении, картина строения тройных сочленений плит, отражающая их крайнюю неустойчивость во времени. Это было показано на Примере таких сочленений в районах о. Буве в Атлантике и о. Родригес в Индийском океане.

Уже в первоначальных схемах, наряду с главными плитами, были выделены плиты второго порядка - их можно назвать мезоплитами, которых вначале также насчитывалось семь. Это плиты Кокос, Карибская, Наска, Скотия, Аравийская, Филиппинская, Каролинская. Их поперечный размер обычно не намного превышает тысячу километров. В дальнейшем получило общее признание выделение таких плит, как Иберийская, Анатолийская, Охотоморская, Амурская. Приводятся доводы в пользу существования самостоятельных плит того же порядка — Сомалийской, Берингии.

Плитами «третьего разряда» - микроплитами, являются плиты с размерами в сотни километров. К числу тех из них, которые утвердились в литературе, относятся микроплиты, выделенные в крайней северо-восточной части Тихого океана, у берегов Канады и США - Горда, Хуан-де-Фука, Эксплорер. К этому же разряду относятся микроплиты, выделенные между Индо-Австралийской и Тихоокеанской плитами на юго-востоке Тихого океана. В принципе в качестве таких же микроплит должны выделяться островные дуги, ограниченные либо с одной, либо с двух сторон зонами субдукции, а с другой - осью задугового спрединга, как Южно-Сандвичева дуга. Более спорной является возможность выделения системы микроплит в широкой полосе диффузной сейсмичности, разделяющей Евразийскую, Африканскую и Индо-Австралийскую плиты в Центральной Азии, крайними звеньями которой являются уже упомянутые Иберийская и Амурская плиты; в некоторых схемах (С.А. Ушакова и др.) их различается до двух десятков. В то же время к числу современных микроплит можно отнести Южно-Каспийскую, ограниченную с севера реликтовой зоной субдукции и имеющей современное отображение в виде сейсмофокальной плоскости, наклоненной в северном направлении (Халилов и др., 1987).

И, наконец, микроплиты приходится выделять в районах тройных сочленений мега- и мезоплит, например в районе о. Пасхи, Галапагосских или Азорских островов.

Необходимо еще заметить, что разделение межплитных границ на дивергентные - спрединговые, конвергентные - субдукционные и трансформные в действительности не является столь однозначным, как это первоначально представлялось. Оказалось, в частности, что направления смещения плит в сторону зон субдукции далеко не всегда строго перпендикулярны по отношению к простиранию последних, и поэтому нередко вдоль них возникает сдвиговая компонента. Не исключено, что последняя присутствует и вдоль некоторых осей спрединга, например, хр. Рейкьянес в Атлантике и хр. Карлсберг в Индийском океане. С другой стороны, вдоль крупных трансформных разломов на некоторых участках, кроме латерального смещения их крыльев, наблюдается растяжение с образованием желобов, а на других - сжатие, т.е. либо транстенсия, либо транспрессия.

Все эти особенности и сложности, наблюдаемые при современном расчленении литосферы на плиты, проявлялись, несомненно, и в геологическом прошлом и должны учитываться при палеотектонических реконструкциях. Это сравнительно просто делать, и делается на основе анализа линейных магнитных аномалий для относительно недавнего прошлого, для последних 180 млн. лет. Гораздо хуже обстоит дело с более ранним временем, когда приходится основываться лишь на геологических и скудных и неточных палеомагнитных данных. Но учитывать возможность достаточно сложных взаимоотношений плит разного порядка в прошлом необходимо при всех условиях.

На коровом уровне основное значение имеет разделение на континенты и океаны. Оно далеко не вполне совпадает с делением литосферы на плиты, но сильно влияет на их внутреннюю неоднородность, так как, по современным данным, мощность литосферы в пределах континентов большей частью превышает 200 км и может достигать 400 км, практически охватывая весь объем коры и верхней мантии, в противоположность океанской литосфере, мощность которой не превосходит 100 км. В настоящее время вполне справедливо признается, что распределение континентальных глыб имеет решающее значение в определении рисунка конвективных течений в верхней мантии (Трубицын, 1999).

Континентальные глыбы составляют существенную часть площади шести из семи главных литосферных плит, занимая, как правило, их центральные части. Лишь Тихоокеанская плита является целиком океанской. При этом Индо-Австралийская плита включает две крупных континентальных глыбы - Индийскую и Австралийскую; это не случайно, так как до позднего эоцена существовали две самостоятельные литосферные плиты, Индийская и Австралийская, разделенные осью спрединга. Помимо крупных континентальных глыб, существуют более мелкие, известные как микроконтиненты, например, Роколл в Атлантике, Магадаскар и Сейшеллы в Индийском океане и др. В геологическом прошлом число таких микроконтинентов временами было гораздо более значительным.

Большую площадь континентов занимают, как правило, древние платформы - кратоны, фундамент которых образует континентальная кора докембрийско-

го, причем, в основном, раннедокембрийского возраста, состоящая из гнейсов, кристаллических сланцев амфиболитовой и гранулитовой фаций и гранитов. В строении Индо-Австралийской плиты, как отмечалось, принимают участие два континента и, соответственно, два древних кратона, а в строении Евразийской плиты - четыре крупных кратона (Восточно-Европейский, Сибирский, Китайско-Корейский, Южно-Китайский) и несколько более мелких континентальных блоков - Синобирмания, Индосиния и др. Континент Евразия является единственным, лежащим в пределах не одной, а трех литосферных плит - Евразийской, Аравийской, Индо-Австралийской.

Помимо древних платформ, в строении континентов участвуют фанерозойские (или позднепротерозойско-фанерозойские) покровно-складчатые пояса - орогены, выраженные в рельефе горными сооружениями, в противоположность равнинному, в основном, рельефу кратонов. Эти пояса обрамляют кратоны либо с одной стороны, как это наблюдается в Южной Америке, Австралии, Антарктиде, либо практически со всех сторон, как то имеет место в Северной Америке, Европе и Азии (кроме Индостана). А Африканский континент почти целиком представляет собой древнюю платформу.

Мощность коры в пределах древних платформ составляет 35-40 км, увеличиваясь до 50-70 км в пределах орогенов. Но часть последних оказывается сnivelированной денудацией и перекрытой более молодыми отложениями осадочного чехла, большей частью юрскими и более молодыми. Там, где этот чехол занимает достаточно большие площади, последние именуются молодыми платформами; наиболее крупная из них - Западно-Сибирская, Западно-Европейская, Восточно-Австралийская, Патагонская.

Существуют несколько генераций орогенов, отвечающих отдельным циклам Бертраана - байкальскому, каледонскому, герцинскому, киммерийскому, альпийскому. Некоторые более древние орогены и даже части древних кратонов испытали тектоно-магматическую активизацию в альпийском цикле и снова превратились в горные сооружения; наиболее крупный из них - Центрально-Азиатский внутриконтинентальный горный пояс.

Распределение континентов и океанов на поверхности Земли явно неравномерно, и в нем уже давно пытаются найти какие-то закономерности. Прежде всего, обращает на себя внимание диссимметрия в мегарельефе Земли - антиподальность восточного, преимущественно, континентального (Индо-Атлантического) и западного океанского (Тихоокеанского) полушарий.

Такая же антиподальность наблюдается и при сравнении Северного и Южного полушарий. Северное является преимущественно материковым, причем его приполярную область занимает океан (Северный Ледовитый), а Южное полушарие — преимущественно океанским, но в его приполярной области располагается материк Антарктида.

Это распределение континентов и океанов на современном лике Земли никак нельзя считать первоначально заданным какими-то глубинными неоднородностями.

ми коры и мантии, так как оно испытывало неоднократные изменения в истории Земли. В эпохи существования суперконтинентов контраст между континентальным и океанским секторами - Пангеей и Панталассой - становился еще более контрастным. Но сама Пангея или ее основные части - Гондвана и Лавразия в позднем протерозое и фанерозое перемещались из одного полушария в другое, из Южного в Северное и наоборот, способствуя развитию или исчезновению материковых оледенений.

*Во всех процессах природы царит
универсальная, в определенной степени
познаваемая для нас закономерность.
Макс Планк*

Глава 2

ЦИКЛИЧНОСТЬ В ПРОЯВЛЕНИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

2.1. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЦИКЛИЧНОСТИ

2.1.1. Некоторые особенности в проявлениях цикличности геодинамических процессов

Цикличность тектонических процессов является фактической основой всех вариантов пульсационной гипотезы развития Земли.

Высококочувствительным индикатором повышения тектонической активности являются землетрясения и извержения вулканов. В начале 1950-х годов было замечено, что суммарная энергия упругой деформации, высвободившаяся за один год в форме сейсмических волн на всем земном шаре, варьирует в широких пределах - в 40-50 раз (Gutenberg, Richter, 1954). При этом периоды повышения сейсмической активности сменяются периодами ее спада. Так, известный сейсмолог Х.Беньофф пришел к выводу, что сильные неглубокие землетрясения, происходящие в разных частях Земли, не являются независимыми событиями. Они связаны, по его мнению, с общепланетарной системой то ослабляющихся, то усиливающихся упругих напряжений.

Б. Гутенберг на основе исследований суммарной энергии глубоких землетрясений, происходящих на глубине от 70 до 700 км, пришел к выводу, что сильные глубокие землетрясения относятся к единой системе напряжений, в которой деформации упругого крипа при сжатии накапливаются или высвобождаются.

В. Морган рассмотрел корреляцию между неравномерностью вращения Земли и числом землетрясений за год. Количество землетрясений возрастает в те годы, когда скорость вращения Земли увеличивается, а момент инерции и радиус уменьшаются.

Некоторые исследователи связывают возможные изменения радиуса Земли с вариациями гравитационной «постоянной». Идея о том, что гравитационная «постоянная» может быть переменной скалярной характеристикой поля, впервые была высказана еще П. Дираком (1979).

П. Кропоткин и Ю.А. Трапезников (1963) отметили, что геологическим фактам смены эпох сжатия, горообразования и складчатости периодами тектонического покоя более соответствует гипотеза о вековых вариациях значения гравитационной «константы».

А.Н. Храмов, А. Билинский (1967) и другие приводили данные палеомагнетизма, которые указывают на колебания величины радиуса Земли в пределах 10% на протяжении последних 500 млн. лет.

Произведенное А.А. Прониным (1969-1973) обобщение огромного литературного материала по хронологии тектонических движений на всех континентах в фанерозое и статистический анализ этих данных показали существование в фанерозойском этапе развития Земли 13 планетарных «циклов» тектонической активности средней продолжительностью около 40-45 млн. лет.

Исследования, проведенные Е.Е. Милановским (1978), также свидетельствуют в пользу наличия планетарной периодичности в развитии рифтового процесса и существования глобальных эпох и «циклов» рифтогенеза примерно такой же продолжительности, что и эпохи и «циклы» складкообразовательных движений, т.е. деформаций сжатия в геосинклиналях.

В кайнозой и мезозой главными зонами деформации обоих типов были как орогенные, так и рифтовые пояса и зоны, хотя, несомненно, что в целом сжатие гораздо сильнее проявилось в орогенные поясах. Растяжение реализовывалось преимущественно в областях рифтогенеза. Что касается платформ, то они, по крайней мере на отдельных своих участках, периодически подвергались деформациям растяжения и сжатия, но значительно меньшим по масштабу в сравнении с тектонически активными зонами (Милановский, 1978).

Важное значение могут иметь исследования вулканической активности за исторически обозримый промежуток времени, с целью получения статистически достоверных результатов. Промежуток времени с 1850 г. по 2000 гг. наиболее полно охвачен в каталогах извержений вулканов Мира, при этом вероятность утери информации носит случайный характер, что не оказывает существенного влияния на общий тренд при выявлении скрытой периодичности в активизации магматических и грязевых вулканов мира.

Нами, совместно с Ш.Ф. Мехтиевым и Т.А. Исмаил-Заде, были проведены исследования активизации магматических и грязевых вулканов Мира, причем такого рода исследования, в отдельности для каждого типа магматических вулканов,

излагались впервые в работах (Мехтиев и др., 1986; Хаин, Халилов, 2007, 2008; Khain, Khalilov, 2003, 2004, 2007). Впоследствии эти результаты были признаны в качестве первого научного открытия в истории азербайджанской науки. Авторам данного открытия Ш.Ф. Мехтиеву, В.Е. Хаину, Т.А. Исмаил-Заде и Э.Н. Халилову были выданы дипломы на открытие № 239 от 15 октября 2003 г. с датой приоритета от 20 сентября 1983 г., по дате первой публикации.

Для проведения исследований вулканической активности все магматические вулканы были разделены на два основных типа: вулканы зон субдукции (типа С), отражающие процесс сжатия земной коры, и вулканы рифтовых зон (тип Р), отражающие процесс растяжения земной коры. В то же время грязевые вулканы, приуроченные также к зонам субдукции, были выделены в самостоятельный тип - **Гр**.

Была выявлена устойчивая скрытая периодичность и составлены графики активизации вулканов типов С и Р. Сравнение графиков показало, что циклы активизации вулканов типов С и Р попадают в противофазу.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что периоды растяжения не совпадают во времени с периодами сжатия Земли - циклы растяжения сменяются циклами сжатия. В первом случае повышается активность вулканов типа Р, а во втором - вулканов типа С и грязевых вулканов, при этом расширение Земли происходит за счет процесса спрединга, в то время как сжатие - за счет процесса субдукции.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют прийти к выводу о возможности периодического изменения радиуса Земли. Более детальные результаты этих исследований будут рассмотрены в последующих главах.

Безусловно, выявленные закономерности в активизации вулканов, а также землетрясений, свидетельствующие о пульсации Земли, должны сказываться и на изменении угловой скорости ее вращения. Нерегулярные флюктуации скорости вращения Земли были замечены в конце прошлого столетия, при обработке наблюдений движений Луны и других тел Солнечной системы. В XX столетии их существование было доказано окончательно (Манк, Макдональд, 1964). С 1955 г. они регистрируются принципиально новым методом, который обеспечивает очень высокую точность (Сидоренков, 1975).

Вектор мгновенной угловой скорости можно разложить на три компоненты: одну вдоль средней оси вращения и две другие - в экваториальной плоскости. Первая характеризует продолжительность суток, а ее изменения - неравномерность вращения Земли. Две другие определяют координаты мгновенного полюса.

Быстро Земля вращалась в 1870 г., а медленно - в 1903 г. С 1903 до 1935 г. происходило ускорение вращения Земли.

Одним из первых явлений, которым пытались объяснить нерегулярные изменения скорости вращения Земли, были колебания уровня Мирового океана и таяние полярных льдов (Манк, Макдональд, 1964). Однако количественные оцен-

ки, сделанные еще в позапрошлом столетии знаменитым английским физиком В.Томпсоном, показали, что для объяснения нерегулярных изменений скорости вращения Земли требуются неправоподобно большие приращения уровня Мирового океана.

Н.С. Сидоренков (1982) считает, что перераспределение влаги между Мировым океаном и ледниковыми покровами изменяет компоненты тензора инерции Земли и, вероятно, объясняет межгодовые изменения скорости вращения Земли и вековое движение северного полюса.

У. Манк и Г. Макдональд (1964) подчеркивают, что причиной вариаций угловой скорости вращения Земли не могут быть ни изменения уровня океана, ни движение материков, ни таяние льдов, ни другие наблюдаемые процессы.

«Нерегулярные изменения угловой скорости вращения Земли, - пишет Н.Н.Парийский, - происходят через промежутки времени от 10 до 30 и более лет, имеют разные величины и знаки, чередующиеся без определенной зависимости. Величина относительного изменения угловой скорости вращения Земли в 1898 г. достигала $3,9 \cdot 10^{-8}$, а около 1920 г. $-4,5 \cdot 10^{-8}$. Таким образом, эти изменения, совершаясь примерно в течение одного года, превосходят приливные изменения угловой скорости вращения Земли за 100 лет». Их нельзя объяснить процессами, происходящими на поверхности, так как для подобного изменения скорости потребовалось бы, например, сплющивание до уровня моря плоскогорья высотой в 4 км, по размерам равного Тибету (Кропоткин, 1970). «Приходится допустить, что скачкообразные изменения угловой скорости связаны с изменениями в глубинных слоях Земли - либо плотностей, либо скоростей подкорковых течений» - писал Н.Н. Парийский. Однако П.Н. Кропоткин (1970) считал, что предположение о быстром изменении скорости подкорковых конвективных течений является несостоятельным. По мнению П.Н. Кропоткина, вариации скорости вращения вызваны изменениями момента инерции твердой Земли.

Между тем, современные смещения магнитного полюса также могут свидетельствовать о глобальных геодинамических и энергетических изменениях в недрах Земли, происходящих в настоящее время и влияющих на вариации угловой скорости вращения Земли.

Эвстатические колебания уровня Мирового океана связываются с эпохами сжатия и расширения Земли (Хаин, 1984; Милановский, 1984; и др.).

Е.Е. Милановский считает, что тщательный анализ фактических данных, с использованием обмеров площадей по палеогеографическим картам всех материков, приводит большинство исследователей к признанию реальности существования главных эвстатических циклов.

А.Л. Яншин (1977) пришел в своих исследованиях к иному мнению. На основе построенных графиков изменения площади суши и моря на разных континентах он пришел к выводу об отсутствии глобальных повсеместных трансгрессий и регрессий. Согласно построенным графикам, получилось, что не было таких периодов, когда все регионы мира одновременно погружались под воду. Однако,

если даже предположить возможность рассматриваемых глобальных изменений уровня Мирового океана, их трудно назвать «катастрофами», так как эти процессы происходили за относительно длительные периоды геологического времени (десятки и сотни миллионов лет).

Имеющиеся на сегодня данные свидетельствуют о том, что, на фоне периодических колебаний уровня Мирового океана, общая тенденция его изменения в настоящее время стремится к повышению уровня со скоростью 1,4-1,6 мм/год. Это также согласуется с нашими выводами о преимущественном сжатии Земли в настоящее время.

Если допустить, что амплитуда рассматриваемых короткопериодных изменений радиуса Земли может меняться в зависимости от соотношения влияния космических и сугубо земных факторов, то можно предположить проявление вариации радиуса за относительно короткий промежуток времени (20-30 лет).

Масштабы затопления континентов зависят от их близости к зонам спрединга или субдукции.

Наибольшему затоплению должны подвергаться те районы, которые находятся в непосредственной близости от зон субдукции. Этот вывод хорошо согласуется с мнением академика А.И. Яншина (1977), так как для одновременного погружения континентов все они должны были бы быть расположены на одинаковом расстоянии от зон спрединга и субдукции, что не наблюдается в действительности.

2.12. Проявления цикличности в инверсиях магнитных полюсов

Настоящий подраздел авторами представлен в большей степени в качестве информационного, в котором даются общие представления о геомагнитном поле Земли и периодических инверсиях магнитных полюсов нашей планеты.

Магнитное поле Земли является неотъемлемой физической характеристикой нашей планеты, отражающей сложные энергетические процессы во внутреннем и внешнем ядре.

Считается, что основной причиной образования магнитного поля Земли является течение огромных масс жидкого железа, составляющих внешнее ядро Земли, вокруг внутреннего твердого ядра Земли.

Впервые предположение о наличии магнитного поля Земли было выдвинуто английским врачом и натурфилософом Уильямом Гильбертом (William Gilbert) в 1600 году в своей книге «De Magnete». Наблюдения английского астронома Генри Геллибранда (Henry Gellibrand) показали, что геомагнитное поле не постоянно, а медленно изменяется. Карл Гаусс (Carl Friedrich Gauss) выдвинул теорию происхождения магнитного поля Земли и в 1839 году доказал, что основная его часть

выходит из Земли, а причину небольших, коротких отклонений его значений необходимо искать во внешней среде.

Коротко рассмотрим структуру магнитосферы Земли. На расстоянии от Земли порядка трех ее радиусов магнитные силовые линии имеют диполеподобное расположение. Эту область называют плазмосферой (рис. 19).

При удалении от поверхности Земли воздействие солнечного ветра усиливается: геомагнитное поле со стороны Солнца сжимается, а с противоположной стороны вытягивается в длинный шлейф. Токи в ионосфере оказывают существенное влияние на магнитное поле на поверхности Земли. Верхняя область атмосферы (плазмосфера), порядка 100 км и выше, содержит большое количество ионов. Плазма удерживается магнитным полем Земли, но ее состояние формируется взаимодействием магнитного поля Земли с солнечным ветром, чем и объясняется связь земных магнитных бурь с солнечными вспышками.

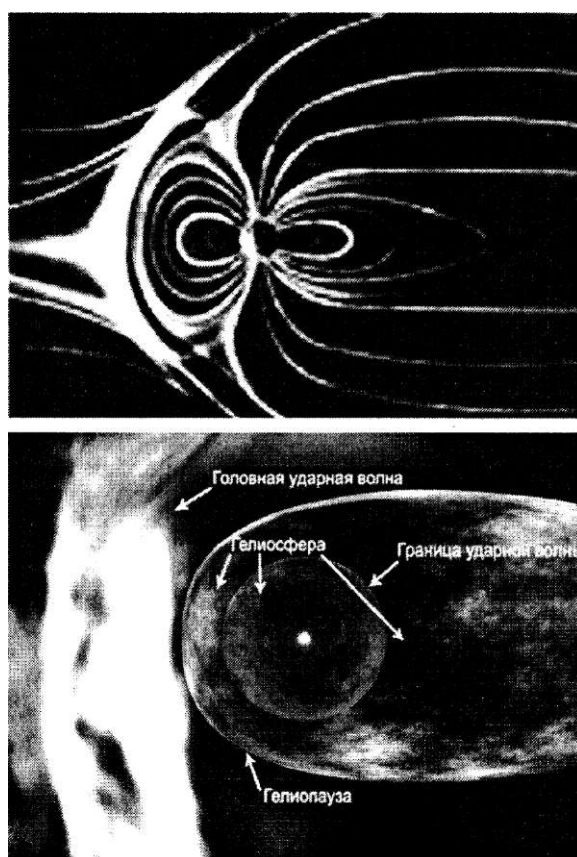


Рис. 19. Структура распределения магнитного поля и магнитных силовых линий геомагнитного поля Земли

Средняя напряженность магнитного поля на поверхности Земли сильно зависит от географического положения и равна около 0,5 э (Эрстед) (50 мкТл). Напряженность магнитного поля на магнитном экваторе составляет около 0,34 э, у магнитных полюсов - около 0,66 э.

В районах магнитных аномалий напряженность резко возрастает и, например, в зоне Курской аномалии достигает 2э.

Магнитное поле Земли периодически испытывает возмущения, называемые магнитными пульсациями, возникающими вследствие возбуждения гидромагнитных волн в магнитосфере Земли. Частотный диапазон пульсаций варьирует от миллигерц до одного килогерца (Троицкая, Гульельми, 1969).

Геомагнитное поле не так уж постоянно, и оно время от времени меняется. Так, 2500 лет назад величина магнитного поля была в полтора раза выше, чем сейчас. В истории Земли неоднократно наблюдались так называемые инверсии геомагнитного поля или переполюсовка, когда менялись местами северный и южный магнитные полюса. Наряду с инверсией геомагнитных полюсов, существуют и менее радикальные смещения геомагнитного поля, так называемые «экскурсы», когда геомагнитные полюса начинают интенсивно смещаться на достаточно значительные расстояния, но при этом переполюсовки не происходит. Так, в истории Земли неоднократно происходили «экскурсы» геомагнитных полюсов, когда северный геомагнитный полюс двигался к экватору, но затем, доходя до него, менял направление движения на противоположное и возвращался в свое прежнее положение. Последний такой экскурс был примерно 2800 лет назад.

Роль геомагнитного поля для существования и развития жизни на Земле трудно переоценить, ибо силовые линии магнитного поля Земли создают вокруг планеты своеобразный магнитный экран, защищающий поверхность Земли от губительных для всего живого космических лучей и потока заряженных частиц высоких энергий.

Смещение магнитных полюсов регистрируется с 1885 г. За последние 100 лет магнитный полюс в южном полушарии переместился почти на 900 км и вышел в Индийский океан (рис. 20).

Так, по данным Центрального военного-технического института сухопутных войск (ЦНИИВТИ СВ) Российской Федерации, результаты исследований, проведенных в конце 2002 года, показали, что северный геомагнитный полюс Земли сместился на 200 км. По мнению ряда ученых ЦНИИВТИ, аналогичное смещение произошло и на других планетах Солнечной системы. Ведущий сотрудник института Евгений Шаламберидзе высказал предположение, что наиболее вероятной причиной смещения геомагнитных полюсов может быть прохождение Солнечной системой через определенную зону галактического пространства и магнитное влияние на нее других космических систем (<http://www.gazeta.ru/2002/0212/last43349.shtml>).

Новейшие данные по состоянию арктического магнитного полюса (движущегося по направлению к Восточно-Сибирской мировой магнитной аномалии через

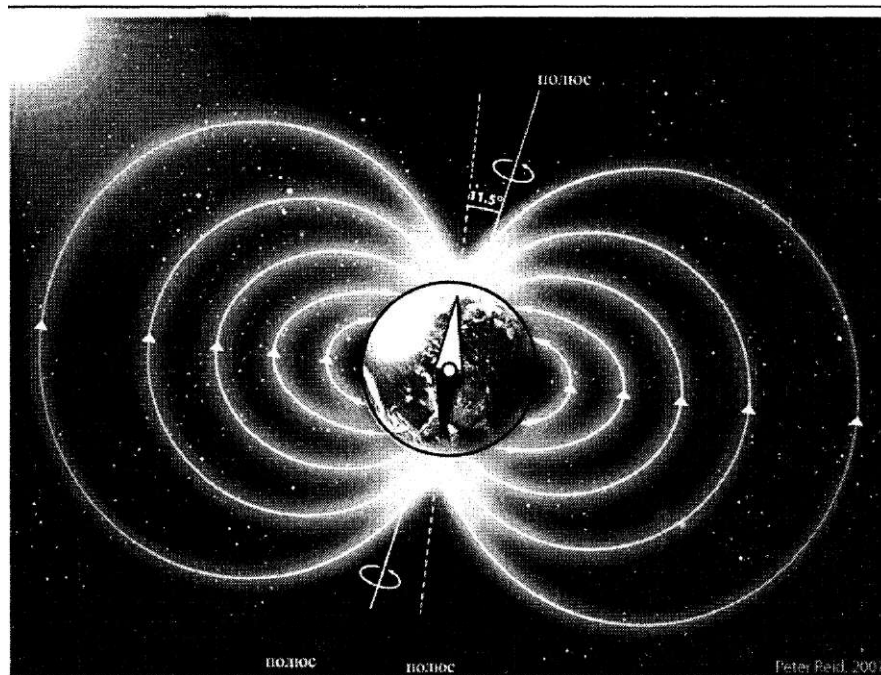


Рис. 20. Схематическое изображение географического и магнитного полюсов Земли (<http://www.scifun.ed.ac.uk/card/images/left/earth-magfield.jpg>)

Ледовитый океан) показали, что с 1973 по 1984 годы северный геомагнитный полюс сместился на 120 км, с 1984 по 1994 г. - более, чем на 150 км.

Характерно, что эти данные расчетные, но они подтвердились конкретными замерами северного магнитного полюса. На начало 2002 года скорость дрейфа северного магнитного полюса увеличилась с 10 км/год в 70-х годах до 40 км/год в 2001 году.

Кроме того, по данным ИЗМИРАН, наблюдается падение напряженности земного магнитного поля, причем весьма неравномерное (<http://www.agnivek.ru/poleus.htm#>). Так, за последние 22 года она уменьшилась в среднем на 1,7 процента, а в некоторых регионах - например, в южной части Атлантического океана - на 10 процентов. По мнению ученых из ИЗМИРАН, ускорение движения полюсов (в среднем на 3 км/год) и движение их по коридорам инверсии магнитных полюсов (более 400 палеоинверсий позволили выявить эти коридоры) приводит к предположению о том, что в данном перемещении полюсов следует усматривать не экскурс, а переполюсовку магнитного поля Земли.

Следует учесть и факт возрастания угла раствора каспов (полярных щелей в магнитосфере на севере и юге), который к середине 90-х годов достиг 45°. В расширившиеся щели устремился радиационный материал солнечного ветра и

межпланетного пространства, т.е. в полярные области стало попадать огромное количество дополнительного вещества и энергии, что приводит к «разогреву» полярных шапок (<http://www.agnivek.ru/polus.htm#>).

В прошлом инверсии магнитных полюсов уже происходили не раз, и жизнь сохранилась. Весь вопрос в том, какие формы жизни могут сохраниться и каким мутациям они подвергнутся? Если, как утверждается в некоторых гипотезах, во время переполюсовки магнитосфера Земли на некоторое время исчезнет - на Землю обрушится поток космических лучей, что может представить реальную опасность для обитателей планеты. Особенно, если исчезновение магнитосферы будет сопряжено с истощением озонового слоя.

Изучение геомагнитных инверсий и колебаний уровня океана в фанерозое позволило ряду исследователей прийти к выводу о существовании между этими процессами определенной корреляции (Милановский, Гамбурцев, 1998). Напряженность магнитного поля Земли в прошлом также подвергалась существенным колебаниям. Так, исследования Г.Н. Петровой и А.Г. Гамбурцева (1998) позволили установить наличие ритмов в палеонапряженности геомагнитного поля, с преобладанием ритмов с периодами 20-25 тыс. лет, 70 тыс. лет, 160-170 тыс. лет и с другими менее выраженными периодами.

Смена полюсов происходит почти каждые 500 тыс. лет. Однако нынешний период распределения магнитных полюсов затянулся - они не менялись местами уже более 750 тыс. лет.

Эти выводы были сделаны в нескольких мировых научных центрах, включая ИЗМИРАН. В 2007 году в Центре космических исследований Дании, после анализа новейших данных, полученных со спутника, осуществляющего мониторинг магнитных полей Земли, пришли к неутешительным выводам. По мнению датских ученых, происходит интенсивная подготовка геомагнитного поля Земли к инверсии магнитных полюсов, и это может произойти значительно раньше, чем ожидалось.

Между тем технологические последствия переполюсовки могут быть катастрофическими, так как современные приборы, включая компасы, ориентируются на вполне определенное направление магнитных полей. Неизвестно также, каковы станут последствия изменения направления магнитных полей для птиц, которые используют их для своих трансконтинентальных перелетов (http://emigration.russie.ru/news/3/315_1.htm).

Инверсия геомагнитного поля - не мгновенный процесс, который, судя по палеомагнитным данным, может длиться тысячелетия. Но вряд ли в настоящее время можно ответить на вопрос: какой минимально возможный период времени может занять процесс переполюсовки?

Например, как известно, Солнечная активность имеет наиболее ярко выраженные циклы двух порядков - 11-летний, характеризующийся резким повышением числа солнечных пятен и вспышек, а также повышением корпускулярного и электромагнитного излучения в космическое пространство, и 22-летний,

характеризующийся сменой знаков меридионального поля магнитных полюсов или магнитной переполусовкой в конце каждого 11-летнего цикла. Но магнитная переполусовка, происходящая на Солнце, характеризуется быстротечностью и достаточно строгой периодичностью. Инверсия солнечных магнитных полюсов, безусловно, оказывает определенное влияние на геодинамические процессы, о чем будет детально сказано в последующих разделах.

К каким еще последствиям может привести продолжающееся и ускоряющееся смещение магнитных полюсов? Учитывая, что данный процесс сопровождается снижением напряженности магнитного поля Земли, можно предположить, что это должно повлиять на глобальные климатические изменения. С одной стороны, ослабление геомагнитного поля приведет к разрушению озонового слоя и увеличению проникновения в атмосферу электромагнитного излучения, особенно в ультрафиолетовом спектре, а также потока заряженных частиц высоких энергий. Соответствующие изменения произойдут, естественно, и в ионосфере. Все эти физические следствия снижения напряженности магнитного поля Земли, могут привести к перераспределению атмосферных потоков и циклонов и, как следствие, глобальным климатическим изменениям.

Безусловно, трудно прогнозировать возможное развитие ситуации с дальнейшим движением геомагнитных полюсов; выразим надежду, что этот процесс все же не будет столь быстротечным.

2.1.3. Космогеометрические аспекты цикличности

И. Кеплер показал, как движутся планеты, но почему они движутся именно так? Какая движущая сила удерживает их на эллиптических орбитах вокруг Солнца и заставляет то увеличивать, то уменьшать скорость, как это следует из второго закона Кеплера?

В середине XVII в. в Англии работали трое выдающихся ученых: разносторонний ученый и экспериментатор Роберт Гук (1635-1703), архитектор, математик и астроном Кристофер Рен (1632-1723) и астроном, физик Эдмунд Галлей (1656-1742); последний занимал должность королевского астронома и известен своими исследованиями комет.

Э. Галлей пришел к выводу, что сила притяжения изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Однако Галлей и его коллеги не смогли доказать математически, что из закона притяжения следует вывод о движении планет по эллиптическим орбитам.

В том же году Галлей отправился в Кембридж за консультациями к И. Ньютону. На вопрос Галлея, по какой траектории должна двигаться планета под действием силы, обратно пропорциональной квадрату расстояния от Солнца, Ньютон незамедлительно ответил, что такой траекторией является эллипс. Он это доказал математически.

Ньютон опубликовал свои результаты в трехтомной книге «Математические начала натуральной философии», вышедшей в свет в 1687 г. В книге Ньютон показал, что тело может совершать движение по кривой конического сечения (окружности, эллипсу, параболе и гиперболе) только в том случае, если на него действует сила, обратно пропорциональная квадрату расстояния и направленная к некоторой фиксированной точке.

Один из постулатов ньютоновской натурофилософии состоял в признании абсолютного мирового времени. Ньютон писал в своей книге: «Абсолютное частное математическое время само по себе и по своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью» (Николсон, 1983).

Следовательно, систему отсчета можно рассматривать как строго заданный способ измерения положения и времени. Инерциальной системой называется система отсчета, в которой тела, при отсутствии внешних воздействий, движутся равномерно и прямолинейно. Согласно Ньютону, инерциальная система отсчета должна находиться в состоянии покоя или равномерного движения по отношению к «абсолютному пространству».

Ньютон писал: «Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным». По его мнению, «абсолютное пространство» обладает свойством лишь воздействовать на тела (оказывать сопротивление их ускорению), но на само это пространство материя действовать не может.

В 1872 г. Эрнст Мах высказал гипотезу, что свойство инерции не имеет ничего общего с «абсолютным пространством», а возникает как результат некоторого рода взаимодействия каждого отдельного тела сразу со всеми остальными массами во Вселенной.

Если бы в мире не было других масс, говорил Мах, то у изолированного тела не было бы инерции. Эта мысль противоречит взгляду Ньютона о том, что тело и в этом случае обладало бы инерцией, как результатом действия абсолютного пространства. А.Эйнштейн назвал гипотезу Маха «принципом Маха».

В 1905 г. Эйнштейн, в то время скромный служащий Швейцарского патентного бюро в Берне, опубликовал работу, посвященную частной теории относительности и окончательно разрушившую шаткие основы классических представлений о пространстве и времени.

Одно из центральных положений частной теории относительности гласит: «ничего не может двигаться в пространстве быстрее света». Есть предположение, что возможны частицы с конечными значениями массы и энергии, которые движутся со скоростью, всегда превышающей скорость света, а по мере уменьшения их скорости, т.е. приближения ее к «световому барьеру», их масса должна бесконечно возрастать.

Эти предполагаемые частицы называют тахионами. Их существование остается предметом научных споров (Николсон, 1983).

Согласно частной теории относительности, никакую информацию нельзя передать быстрее скорости света. Если бы можно было информацию передавать быстрее скорости света, то мы узнавали бы о событиях, которые еще не произошли, и могли бы их предотвратить. Тем самым был бы нарушен основополагающий принцип современного естествознания: причинно-следственная связь.

Частная теория относительности подорвала две главные основы ньютоновской теории: «пространство и время перестали быть абсолютными». Оказалось, что наблюдатели, движущиеся друг относительно друга с постоянной скоростью, близкой к скорости света, должны получать разные результаты при измерении времени и длины.

На Тбилисской конференции 1965 г. Рукманом и Юхвидином был предложен интересный проект по проверке спецрелятивистского отставания времени. Предлагалось сравнить показания двух атомных часов, которые в начальный момент были согласованы по частоте и фазе колебаний, а затем одни часы должны были поместить на движущемся искусственном спутнике Земли. При движении спутника со скоростью 8 км/сек для получения эффекта, заметно превышающего погрешности, требуется около 3-х суток. При этом отставание составит 97 мксек, тогда как погрешность можно свести до 1 мксек (Брагинский, 1965).

В 1916 г. А. Эйнштейн опубликовал свою общую теорию относительности. Общая теория относительности объединила принцип эквивалентности и представление об искривлении пространства-времени массивными телами.

Общая теория относительности в корне изменила наши представления о пространстве, времени, тяготении. Тяготение перестало быть силой, действующей на расстоянии, как в теории Ньютона, а оказалось тесно связанным с геометрией пространства и времени. Выяснилось, что тела не испытывают непосредственного воздействия гравитационных сил, и их движение - это ответная реакция на кривизну пространства-времени. Любое изменение гравитационного поля какого-либо тела не передается мгновенно в любую точку пространства, а распространяется со скоростью света.

Считается, что G (гравитационная постоянная) всегда имеет одну и ту же величину, т.е. неизменна и абсолютна. Однако существуют гипотезы о возможности изменения значения G во времени.

Первым, кто подверг сомнению неизменность гравитационной постоянной G , был П. Дирак из Кембриджского университета. В 1937 г. им была высказана «гипотеза больших чисел», согласно которой существуют определенные соотношения между ключевыми физическими величинами. К примеру, сила электростатического отталкивания между двумя электронами относится к силе их гравитационного притяжения, как $10^{40}:1$. Отношение возраста Вселенной, оцениваемого в интервале 10^7 - 10^{18} , ко времени, которое требуется лучу света, чтобы пройти электрон в поперечнике, также равно $10^{40}:1$ (Дирак, 1979).

Существующие на сегодня астрономические наблюдения свидетельствуют о расширении Вселенной.

Итак, галактики удаляются друг от друга. Сколько будет длиться этот процесс, вечно? Или настанет время, когда скорость разбегания галактик начнет уменьшаться под действием силы притяжения и, в конечном счете, дойдет до нуля, после чего галактики начнут сближаться.

Если скорость галактики достаточно велика, то она будет продолжать свое движение вечно (открытая Вселенная), если же скорость галактики недостаточна, то она, в конце концов, уменьшится до нуля, после чего галактика будет двигаться к центру Вселенной (замкнутая Вселенная).

В случае, если Вселенная замкнута, развитие ее будет подчиняться определенным циклам сжатия и расширения. Эта идея лежит в основе гипотезы пульсирующей Вселенной.

Будут ли в действительности все циклы равны по амплитуде? Если основываться на существующих физических законах, то амплитуда циклов должна уменьшаться с каждым циклом, до полного затухания. Но почему мы должны считать, что развитие Вселенной подчиняется известным на сегодня законам физики? Скорее всего, законы развития Вселенной, в основном, пока еще не известны.

Если же Вселенная все же расширяется, что ее ожидает в будущем?

Дж.Б. Берроу из Оксфордского и Ф. Типлер из Калифорнийского университетов считают, что в конечном итоге последней стадией существования материи окажется безбрежное море разряженного излучения, остывающего до конечной температуры.

Мысль о «тепловой смерти» Вселенной была высказана еще в 1854 г. Германом Гельмгольцем.

Один из основных вопросов космологии: открыта или замкнута наша Вселенная? В рамках модели Фридмана основной путь, по которому пытаются решить эту проблему, сводится к измерению средней плотности ρ_0 вещества во Вселенной.

Если $\rho_0 > \rho_{oc}$, ($\rho_{oc} = 3/8\pi$), $H_0^2/G \sim 10^{29}$ г-см⁻³, Вселенная замкнута, если $\rho_0 < \rho_{oc}$ - открыта.

Существующие наблюдательные данные показывают, что $\rho_0 \sim 0,1 \rho_{oc}$. Из-за существования значительных скрытых (от наблюдения) масс возможно, что $\rho_0 \sim \rho_{oc}$.

В отличие от Г. Гельмгольца, Дж.Б. Берроу, Ф. Типлера и других сторонников идеи «тепловой смерти» Вселенной, можно допустить, что пульсационный характер развития является основным свойством эволюции многих естественных систем, включая как нашу планету, так и Вселенную в целом.

Рассматривая ограничения, которые накладывает гипотеза больших чисел на расширение Вселенной, Дирак заключил, что пульсирующие модели Вселенной исключаются. Они содержат максимальный размер Вселенной, и, поскольку это соответствует очень большому числу, не зависящему от времени, Дирак считал пульсирующие модели противоречащими теории больших чисел. Дирак доказывал, что, в соответствии с его теорией, любое замедляющееся расширение Все-

ленной запрещено гипотезой больших чисел. Если предположить, что Вселенная не сохраняет своих размеров, то возникает вопрос, насколько постоянна в этом случае гравитационная постоянная G . Согласно принципу Маха, инерция тела, есть результат влияния масс всех удаленных объектов Вселенной. Как отмечал в 50-х годах Д. Шама, такое влияние по своей природе является гравитационным взаимодействием. Следовательно, естественно ожидать ослабления этого взаимодействия по мере увеличения размеров Вселенной. Согласно принципу эквивалентности, гравитационная и инерционная массы обязательно должны быть пропорциональны, что означает увеличение G при сжатии Вселенной.

На основе приведенных соотношений было сделано предположение, что значение G должно изменяться обратно пропорционально возрасту Вселенной, т.е. с течением времени гравитационное взаимодействие должно было ослабевать.

Если придерживаться гипотезы пульсирующей Вселенной, то гравитационная постоянная, так же как и радиус Вселенной, должна попеременно увеличиваться и уменьшаться. Так ли это на самом деле?

Даже в настоящее время, как это ни парадоксально, в эпоху интенсивного освоения Космоса, наука не может однозначно ответить не только на этот вопрос, но и на вопрос о природе самого тяготения. Существуют ли элементарные частицы, не имеющие массы - гравитоны? Возможны ли гравитационные волны?

Согласно корпускулярной гипотезе гравитации, в пространстве с огромной скоростью движутся ультракосмические частицы - гравитоны, свободно проходящие через тела и теряющие при этом незначительную часть своего импульса сил. Если в пространстве имеется только одно тело, то оно подвергается всестороннему сжатию. В случае наличия в пространстве двух тел, между ними возникают силы притяжения. Это связано с тем, что поглощение импульса сил этими телами со сторон, обращенных друг к другу, будет меньше, чем с противоположных сторон. Тела в гравитационном вакууме создают неоднородность (поле) только в присутствии другого тела. Очевидно, что общее поле нескольких тел не равно сумме их отдельных полей, т.е. должно наблюдаться нечто подобное экранированию (Веселов, 1977).

К.Е. Веселов в развитие гипотезы о корпускулярной природе гравитационных волн отмечает, что «нарушение динамического равновесия обмена между вакуумом и телами, а следовательно, и неоднородность гравитационного вакуума, возникают только под действием внешних сил, совершающих работу, т.е. изменяющих скорость тела, либо относительное положение тел. Если этого не происходит, то при свободном движении планет и других тел никакого поглощения вакуума, роста массы и торможения не должно наблюдаться».

По мнению К.Е. Веселова, если рассматривать гравитационное поле как свойство гравитационного вакуума, можно допустить изменение этих свойств во времени и в пространстве. Изменение солнечной активности, а следовательно, и корпускулярного излучения, может изменить плотность гравитационного вакуума и величину гравитационной постоянной.

Весьма интересные результаты за последние десятилетия получены при изучении неприливных изменений силы тяжести. Первые исследования по изучению неприливных изменений силы тяжести были начаты в Институте Физики Земли АН СССР в 1935 г. Толчком к началу этих работ послужили расхождения между повторными определениями силы тяжести на Кавказе и в Средней Азии, достигающие десятков мГал (Абакелия, 1936). Ю.Д. Буланже и П.Н. Парийским (1972, 1984) были проведены повторные маятниковые измерения силы тяжести на Центральном Кавказе. В результате анализа, выполненного Н.Н. Парийским, было установлено, что эти расхождения являются главным образом результатом накопления ошибок измерений. Если же изменения силы тяжести во времени и существуют, то они не могут превосходить нескольких десятых долей мГал в год.

Во многих работах Барта дано теоретическое обоснование возможных изменений силы тяжести глобального характера. Он предполагал возможность перемещения ядра Земли относительно ее оболочек, при этом допускались изменения силы тяжести во времени до 0,5 мГал/год в районах больших аномалий. Однако эти работы не получили ни теоретического, ни экспериментального подтверждения.

Расчеты, выполненные Н.Н. Парийским (Pariyskiy, 1982) показали, что если изменения силы тяжести связаны с процессами, вызывающими неравномерность вращения Земли, то они могут достигать первых десятков мкГал/год.

К концу 60-х годов в инструментальной гравиметрии произошел огромный скачок, связанный с созданием принципиально новых приборов - абсолютных лазерных баллистических гравиметров, обладающих весьма высокой точностью.

С 1967 г. А. Сакума в Севре стал систематически проводить измерения абсолютной величины силы тяжести своим стационарным баллистическим гравиметром. По оценкам А. Сакумы, погрешность его измерений составляет единицы мкГал. Кривая наблюдаемых значений имеет четко выраженный минимум, соответствующий 1968 году (Веселов, 1977).

Изучение неприливных изменений силы тяжести с советским абсолютным гравиметром ГАБЛ было начато в 1976 г. За истекшее время проведены многократные повторные определения на пункте Ледово в Новосибирске, в 1976, 1978 и 1980 гг. - в Потсдаме, в пяти пунктах на Австралийском континенте, в Тасмании, Папуа-Новой Гвинее, сделаны три измерения в Сингапуре, в двух пунктах в Финляндии.

Рассмотрим результаты повторных определений силы тяжести на пунктах Потсдам, Ледово, Новосибирск. В интервале времени с 1975 г. по 1978 г., когда наблюдались максимальные скорости изменений силы тяжести, изменения на этих пунктах оказались практически одинаковыми и равными в среднем $10,0 \pm 2,3$ мкГал/год (Буланже, 1984). Таким образом, изменения силы тяжести, установленные с помощью гравиметра ГАБЛ, наблюдались вдоль линии протяжен-

ностью 5 тыс. км, что впервые позволяет сделать вывод о глобальном характере наблюдавшихся изменений силы тяжести.

В Мексике, между пунктами Такибайя и Отель Женева, по измерениям, проведенным в 1949, 1955, 1967 и 1978 гг., установлено изменение силы тяжести со средней скоростью до 60 мкГал/год. На Ашхабадском геодинамическом полигоне было уверенно зафиксировано изменение силы тяжести более 80 мкГал/год, вызванное изменением гидрологического режима глубинных вод в период подготовки землетрясения (Boulanger et al., 1981). Таким образом, по-видимому, можно достаточно уверенно говорить о периодических изменениях силы тяжести в различных регионах Земли. Как отмечают Д.Д. Иваненко и Б.Н. Фролов (1984), изменение силы тяжести на поверхности Земли может быть вызвано не только деформацией земного шара, но и непосредственно изменением величины гравитационной постоянной G в окрестности Земли.

Д.Д. Иваненко и В.Н. Фролов, опираясь на теорию изменения гравитационной постоянной Йордана-Бранса-Дикке, выделяют на основе современной теории гравитации три причины изменения гравитационного поля вблизи Земли: возможные изменения гравитационной постоянной, в частности волнового типа; эффективное изменение гравитационной постоянной, обусловленное космологическими обстоятельствами; низкочастотные гравитационные волны.

В предыдущих разделах нами указывалось на возможность периодических изменений радиуса Земли. Как отмечает П.Н. Кропоткин (1984), «о кратковременных вариациях величины радиуса Земли (R) сейчас можно говорить достаточно определенно, так как хорошо изученные вариации угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси обнаруживают явную корреляцию с вариациями ускорения силы тяжести». Итак, какое отношение имеют предполагаемые изменения гравитационной постоянной к земным катастрофам? П.Н. Кропоткин отмечает наличие корреляционной связи между вариациями угловой скорости вращения Земли, ускорением силы тяжести и годовой энергией землетрясений.

Как уже отмечалось, на основе изучения пространственно-временного распределения вулканической активности нами сделан вывод о периодическом изменении радиуса и формы Земли. Многочисленные корреляционные исследования позволяют допустить, что причиной таких глобальных изменений могут быть космические факторы. Одним из таких факторов являются сверхдлинные гравитационные волны, обладающие гигантскими длинами и без конца пронизывающие космическое пространство, излучаемые во время процессов астрономического масштаба во Вселенной. В последующих главах эта проблема будет раскрыта более детально.

Основные принципы подхода к проблеме

Изучению закономерностей современных проявлений вулканизма и сейсмичности посвящено много работ советских и зарубежных исследователей. Однако

анализ этих процессов производился обособленно, в отрыве от изучения многих глубинных и космических факторов.

В основу настоящих исследований был положен следующий подход.

Вулканизм и сейсмичность, тектонические вертикальные и горизонтальные движения литосферы и ее составляющих, глубинное строение и энергетическое состояние земной коры, формирование и размещение месторождений полезных ископаемых, динамика флюидов и т.д., являются различными элементами общей системы, теснейшим образом взаимосвязанными между собой, а также с процессами в гидросфере, атмосфере и космосе.

Следовательно, только комплексный и объективный подход к проблеме изучения современной геодинамики позволит с наименьшими искажениями реальной картины взглянуть на процессы, происходящие на нашей планете, определить роль и место каждого из них в общей системе современной тектонической активности.

Основное внимание в работе уделено вулканизму и сейсмичности как наиболее ярким проявлениям тектонической активности Земли, при этом сделана попытка связать эти процессы не только с глубинными факторами, но и с процессами в гидросфере, атмосфере и космосе. Установлены корреляционные связи между цикличностью вулканизма и сейсмичности, колебаниями уровня Мирового океана, изменениями угловой скорости вращения Земли, вариациями абсолютных значений силы тяжести на больших территориях, солнечной активностью и некоторыми другими явлениями. Сделана попытка выявить степень взаимосвязи различных элементов единой динамической системы "твердая Земля - гидросфера - атмосфера - космос" и на этой основе разработать модель современной геодинамики Земли.

Главной мыслью, заложенной в основу модели современной геодинамики Земли, является понимание того, что нами рассмотрен всего лишь мгновенный временной срез в геологическом развитии Земли, высветивший целый ряд сложных взаимосвязей и процессов, недоступных выявлению при изучении их в геологических масштабах времени, в связи с их кратковременностью или же отсутствием оставляемых ими «фактических следов».

Одним из важных тезисов, легших в основу исследований вулканической и сейсмической активности, явилось раздельное изучение извержений вулканов и землетрясений в зависимости от их приуроченности к тому или иному типу геодинамических поясов Земли.

Таким образом, все вулканы и землетрясения были нами разделены на четыре геодинамических типа - поясов сжатия Земли (С), океанских рифтовых зон (ОР), континентальных рифтовых зон (КР), океанских внутриплитовых зон (ОВ). В качестве самостоятельного типа нами исследовались грязевые вулканы (ГР). Такой подход к проблеме был осуществлен впервые. Как показали результаты исследований, цикличность в извержениях вулканов различных геодинамических типов смещена во времени.

Одним из наиболее важных выводов является то, что не только атмосфера и гидросфера находятся в постоянной динамике, но и «твердая Земля» подвержена значительно более сложным динамическим процессам и перестройке структуры, чем предполагалось, причем в коротких временных интервалах, сопоставимых с десятками и сотнями лет.

Об этом свидетельствуют и полученные в последние годы факты «исчезновения» зарегистрированных ранее сейсмических границ земной коры (Berry, 1980; Шукин и др., 1984), смещенные плоскости разломов земной коры на различных глубинных уровнях, приуроченность очагов землетрясений к внутриблоковым частям земной коры.

В частности, удалось установить, что геодинамические блоки земной коры неправомерно отождествлять с принятыми в геологии тектоническими блоками, т.к. они отражают лишь современное энергетическое и динамическое состояние литосферы. В пределах геодинамических блоков идентичны пространственно-временные закономерности проявлений вулканизма и сейсмичности и наблюдается одинаковое распределение тектонической энергии в объеме, частичным отражением которой является сейсмическая энергия. Кроме того, геодинамические блоки не являются «сквозными» для земной коры, а смещены на ее различных уровнях. Таким образом, блоковая структура на различных глубинах земной коры может существенно отличаться.

Проведенные исследования позволяют пересмотреть и некоторые взгляды на механизм очагов землетрясений. Полученные данные подтверждают результаты некоторых работ О.Д. Гоцадзе (1969), Г.Е. Егоркина (1980), А.И. Полетаева (1983) и позволяют прийти к выводу о приуроченности многих очагов сильных землетрясений к внутренним частям геодинамических блоков земной коры как в плане, так и по разрезу, что противоречит представлениям о связи всех очагов землетрясений с глубинными разломами. Сделано заключение о возможности приуроченности очагов к разломам только определенного порядка и характера, при этом предполагаются два типа землетрясений: I - землетрясения, являющиеся результатом подвижки вдоль разрыва; II - землетрясения, очаги которых приурочены к некоторому объему (по Г.П. Горшкову (1984)) и возникающие в результате разрядки в нем напряжений, в процессе которой образуется разрыв.

Представительность используемых в работе данных

Как известно, степень достоверности полученных результатов непосредственно зависит от представительности и корректности используемых данных, в связи с чем этому вопросу в настоящей работе уделено большое внимание.

Данные об извержениях вулканов мира нами были взяты из каталога извержений вулканов Мира (Гущенко, 1979), который в настоящее время является наибо-

лее полным среди опубликованных международных каталогов. Классификация магматических вулканов на типы взята из работы Х. Раста (1982).

Данные об извержениях грязевых вулканов были взяты из каталога А.А. Якубова и др. (1974) и работы Р.Р. Рахманова (1982), являющихся единственными работами, обобщающими извержения вулканов по Азербайджану и Миру.

Данные о землетрясениях Мира брались нами из каталога землетрясений мира Мирового центра данных (МЦД) - Б2, включающего каталоги землетрясений РДЕ за 1928-1981 гг. и каталог землетрясений Гутенберга-Рихтера с 1904 по 1952 г. На основе этих каталогов нами был составлен сводный каталог землетрясений Мира с 1904 по 1981 г., охватывающий 117646 землетрясений.

Данные о сильных землетрясениях Мира с магнитудой $M > 7$ с 1500 по 1981 годы брались из каталога, приведенного в работе Дж.А. Эйби (1982) и составленного на основе "Каталога разрушительных землетрясений" Джона Мильна.

Необходимо отметить, что за более поздние периоды времени, данные по извержениям вулканов и землетрясениям брались из Мирового Центра Данных - Б2 и других Интернет-источников.

Данные об извержениях магматических вулканов Мира

Хотелось бы отметить, что систематизация данных об извержениях вулканов Мира осуществлялась, начиная с прошлого века, Гумбольдтом (Humboldt, 1824), Ляйеллем (Lyell, 1830), Фухсом (Fuchs C.W.C., 1865), Меркалли (Mersalli, 1907), Шнейдером (Schneider, 1911), Саппером (Sapper, 1917, 1927), Арльдтом (Arlt, 1918) и рядом других исследователей. Однако работы указанных авторов представляли собой краткие характеристики отдельных вулканов и групп вулканов и их извержений. Первые каталоги по извержениям вулканов начали публиковаться с 1951 года, когда вышла первая часть каталога по Индонезии. В последующем были опубликованы каталоги по извержениям вулканов отдельных регионов и в целом по Миру. В каталоге Н.И. Гущенко представлены данные о 933 вулканах Мира, что на 253 вулкана больше по сравнению с числом вулканов, описанных в международных каталогах, опубликованных в Италии.

Все приведенные в каталоге вулканы Мира были нами разделены на четыре геодинамических типа: вулканы поясов сжатия Земли (С), вулканы океанских рифтовых зон (ОР), вулканы континентальных рифтовых зон (КР), вулканы океанские внутриплитные (ОВ). Классификация была произведена по Х. Расту (1982).

Самая ранняя датировка извержения вулкана, приведенная в каталоге - 1500 г. до н.э. Последние даты извержений относятся к 1978 году. Общее количество извержений, отмеченных в каталоге, составляет 5150.

Учитывая утерю информации об извержениях вулканов, повышающуюся с увеличением рассматриваемого временного периода, нами была произведена разбивка временного периода с 1500 по 1978 годы на два интервала: с 1500 по 1800

год и с 1800 по 1978 год. Естественно, что потеря информации за временной период с 1800 по 1978 годы значительно ниже, чем с 1500 по 1800 год, следовательно, эти два временных периода отличаются степенью достоверности. Поэтому рассмотрение извержений вулканов по каждому из указанных периодов времени производилось отдельно. Ниже приведена таблица 1 с данными об общем числе извержений вулканов мира различных геодинамических типов. Данные по извержениям вулканов и землетрясениям брались из различных ИНТЕРНЕТ-сайтов, в том числе из каталогов:

1. Significant Earthquakes of the World
<http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqarchives/significant/>
2. Earthquakes data courtesy of the USGS NEIC
<http://www.iris.edu/seismon/>
3. Global Volcanism Program
www.volkano.si.edu
4. Bulletin of the Global Volcanism Network
5. USGS Volcano Hazards Program
<http://volcano.usgs.gov/>
6. Volcano World Eruptions
<http://volcanoworld.wordpress.com>
7. www.pnsn.org/INFO_GENERAL/volcanoes.html

Данные об извержениях грязевых вулканов Мира

Грязевые вулканы - явление более редкое и менее изученное по сравнению с магматическими вулканами. Принято считать грязевой вулканизм локальным проявлением геологических процессов, связанных с нефтегазообразованием. Около половины грязевых вулканов мира расположено в Азербайджане и в Южно-Каспийской впадине.

Данные по извержениям грязевых вулканов Азербайджана были обобщены в каталоге А.А. Якубова и др. (1974), а затем - в работе Р.Р. Рахманова (1982)

Таблица 1

Распределение числа вулканов и их извержений в зависимости от их геодинамических типов

Наименование типа вулканов	Количество вулканов	Количество зафиксированных извержений вулканов	
		с 1500 по 1800	с 1800 по 2000
С	751	621	2115
ОР	90	88	123
КР	71	-	93
ов	17	35	115

Сведения об извержениях грязевых вулканов в целом по Миру были обобщены в каталоге, приведенном в работе Р.Р. Рахманова (1982). В связи с тем, что грязевой вулканизм начал привлекать внимание ученых сравнительно недавно, а извержения грязевых вулканов не являются столь заметными событиями, как извержения магматических вулканов, сведения об этих извержениях охватывают сравнительно короткий промежуток времени. Поэтому нами рассматривались извержения грязевых вулканов мира с 1800 по 2000 годы. Общее число известных грязевых вулканов мира составляет около 500.

Данные о землетрясениях

Регулярные сейсмические наблюдения начались с 1900 года и ознаменовались выпуском целого ряда бюллетеней и каталогов: Бюллетеня постоянной центральной сейсмологической комиссии (БПЦСК), публиковавшегося в России в 1902-1908 гг. под руководством Г.В. Левицкого, бюллетеней отечественной сети сейсмических станций 1902-1912 и 1928-1973 гг., ISS, бюллетеней BCIS и Сейсмологической службы США, индивидуальных бюллетеней зарубежных станций за 1900-1970 гг. и др.

Данные о землетрясениях Мира нами использовались по каталогу Мирового центра данных (МЦД) - Б2, включающему каталог землетрясений РДЕ за 1928-2000 г.г., и каталогу землетрясений Гуттенберга-Рихтера, 1904-1952 гг. Общее число всех землетрясений в каталоге за период с 1904 по 1981 годы составляет более 200 тысяч событий.

Были также использованы данные о сильных землетрясениях мира с магнитудой >7 с 1500 по 2000 годы, причем данные об исторических сильных землетрясениях с 1500 по 1902 г. были взяты из каталога, составленного на основе «Каталога разрушительных землетрясений» Джона Мильна. Данные о сильных землетрясениях с 1903 по 2000 годы брались на основе сопоставления сведений, приведенных в каталогах МЦД - Б2 и Сейсмологической Службы США.

2.2. ВУЛКАНИЗМ И СЕЙСМИЧНОСТЬ

2.2.1. Пространственное распределение вулканизма и сейсмичности

Анализ распространения вулканов Мира показывает, что они расположены в основном в узких тектонически активных зонах Земли (рис. 21).

Магматические вулканы делятся на два основных типа - вулканы зон субдукции (обозначим их вулканами типа С) и вулканы рифтовых зон (обозначим их вулканами типа Р).

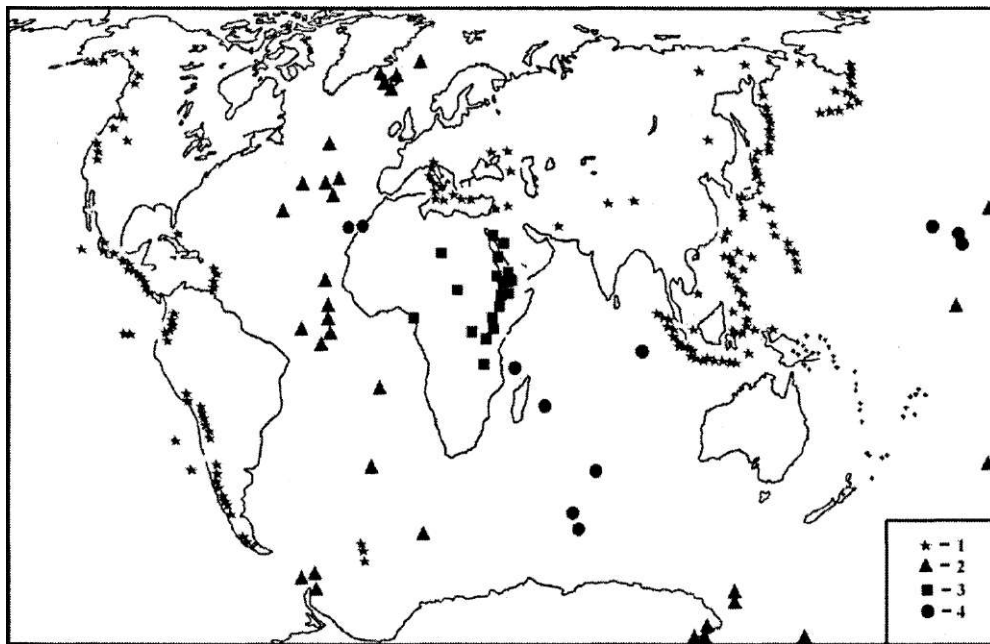


Рис. 21. Схема расположения зон магматического вулканизма Мира

1, 2, 3 и 4 - соответственно магматические вулканы поясов сжатия Земли, океанских рифтовых зон, континентальных рифтовых зон и океанские внутриплитные

К первому типу относятся вулканы зон субдукции и связанных с ними краев микроплит. Вулканизм этого типа является смешанным эксплозивно-эффузивным от основного до кислого, но преимущественно среднего состава. К нему относятся, например, все вулканы западного края Американского и восточного края Азиатского материков, а также прилежащих островных дуг, вулканы области Средиземного моря и т.д.

Ко второму типу относятся вулканы океанских и континентальных рифтовых зон. Это преимущественно толеитовый эффузивный подводный вулканизм срединно-океанских хребтов, а также вулканизм расположенных на них островов, таких, как, например, Исландия или Азорские острова (океанские рифтовые вулканы). К этому типу также приурочены континентальные рифтовые вулканы, расположенные, например, в Красном море, в Восточной Африке и т.д. Обозначим океанские рифтовые вулканы - ОР, а континентальные рифтовые* - КР.

Помимо вышеуказанных, известен еще один тип магматических вулканов - океанские внутриплитные вулканы (обозначим их вулканами типа ОВ). К ним относятся вулканы, расположенные во внутренних частях плит, такие, как, например, на Коморских и Гавайских островах.

Ниже приводится перечень районов расположения магматических вулканов и их классификация, принятая по Х. Расту (1982).

Вулканы зон субдукции

1. Атлантический океан

Срединно-Атлантический хребет (ОР)

Остров Ян-Майен

Исландия

Азорские острова

Острова Тристан-да-Кунья

Глубоководные впадины (ОВ)

Канарские острова

Острова Зеленого Мыса

Островные дуги западной окраины (С)

Малые Антильские острова

2. Пояс складчатых сооружений Евразии (С)

Италия - Сицилия

Эгейское море

Полуостров Малая Азия, Армения, Иран

3. Африка - Аравийский полуостров

Аравийский полуостров

Красное море

Эфиопия

Восточная Африка

Центральная Африка

Западная Африка

4. Индийский океан (ОВ)

Коморские острова

Остров Реюньон

Остров Кергелен

5. Тихий океан

Гавайские острова

Остров Сан-Бенедикта

Острова Галапагос

Остров Хуан Фернандес

6. Тихоокеанский пояс (С)

Островные дуги северой и северо-западной окраины

Аляска

Алеутские острова
Камчатка
Курильские острова
Япония
Бонин-Марианская дуга
Островные дуги и архипелаги юго-западной окраины
Филиппинские острова
Остров Новая Гвинея
Остров Новая Британия
Острова Адмиралтейства
Соломоновы острова
Острова Санта-Крус
Острова Новые Гебриды
Острова Самоа
Острова Тонга
Остров Кермадек
Новая Зеландия
Острова Баррен
Остров Суматра
Остров Кракатау
Остров Ява
Малые Зондские острова
Море Банда
Остров Целебес
Остров Сангихе
Остров Хальмахера
Восточная (тихоокеанская) окраина материка Америка
Северная Америка
Мексика
Коста-Рика
Никарагуа
Сальвадор
Гватемала
Колумбия
Эквадор
Перу, Боливия
Чили, Аргентина

7. Антарктида

Помимо магматических вулканов, выделяется еще один тип - грязевые вулканы. Продуктом извержения грязевых вулканов является брекчия.

На территории СНГ грязевой вулканизм развит в следующих районах: Азербайджан, Юго-Западная Туркмения, Грузия, Западная Кубань, Таманский и Керченский полуострова, остров Сахалин.

За рубежом грязевые вулканы развиты в следующих регионах Мира:

Венесуэла	Моян
Колумбия	Китай
Мексика	Япония
Перу	Новая Зеландия
Эквадор	Малайский архипелаг
Италия	Остров Тринидад
Румыния	Остров Суматра
Иран	Остров Ява
Пакистан	Остров Калимантан
Индия	Остров Тимор

Сравнение карты расположения грязевых вулканов Мира с картой расположения границ литосферных плит привело к следующим выводам. Все грязевые вулканы мира расположены в пределах поясов сжатия Земли. Этот факт привел нас к выводу о неразрывной связи генезиса грязевых вулканов с этими зонами, что само по себе не вписывается в сложившиеся представления о локальности и автономности развития грязевых вулканов. Очевидно, грязевые вулканы так же, как и магматические вулканы типа С, отражают геодинамическую обстановку зон субдукции (рис. 22) (Мехтиев, Халилов, 1984).

Изучению закономерностей пространственного распределения сейсмичности Земли посвящены работы Н.И. Гуттенберга, К.П. Рихтера, Н.И. Гущенко, Г. Беньофа, Н.А. Белявского, Г.П. Горшкова, Ю.В. Ризниченко и др.

Ежегодно на нашей планете регистрируется около миллиона толчков, из которых 2-3 - катастрофических планетарного характера с энергией около $1\text{-}10^{18}$ Дж, 15-20 - сильнейших регионального характера ($110^{16}\text{-}110^{17}$ Дж), 100-150 - сильных локального характера ($110^{12}\text{-}1\text{-}10^{14}$ Дж) и 5-7 тыс. - слабых местных ($10^{12}\text{-}110^{14}$ Дж).

Глубины очагов землетрясений существенно варьируют от нескольких километров до 600-700 км. Однако в целом, с увеличением глубины гипоцентров частота землетрясений уменьшается. Эту особенность сейсмической активности Земли проследили Б. Гутенберг и Ч. Рихтер (1965). В различных регионах преобладают различные значения глубин гипоцентров землетрясений, что зависит от тектонического строения региона. Так, большая часть сейсмической активности западного побережья США и Канады складывается из очагов землетрясений с глубинами гипоцентров 20-30 км. В то же время южное побережье Мексики характеризуется наличием двух групп толчков - слабых мелкофокусных и сильных со средними значениями глубин, увеличивающимися в направлении от береговой линии вглубь континента (Ломнитц, Розенблюд, 1981).



Рис. 22. Схема расположения грязевых вулканов и зон субдукции Мира

1 - зоны, осложненные грязевым вулканизмом; 2 - зоны субдукции; 3 - трансформные разломы; 4 - предполагаемые разломы

Анализ распространения землетрясений на Земле показывает, что они приурочены в основном к узким сейсмическим зонам. Наибольшей активностью характеризуется периферия Тихого океана, образующая Тихоокеанский сейсмический пояс. Значительное число очагов землетрясений сосредоточено в Средиземноморско-Индонезийском сейсмическом поясе, протягивающемся от Гибралтара через Средиземное море, Малую Азию, Ближний Восток и Гималаи к островам Индонезии (рис. 23).

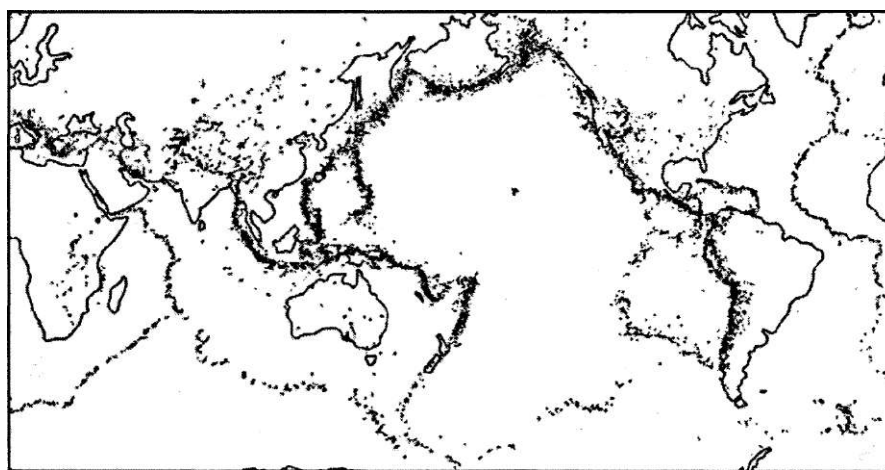


Рис. 23. Карта эпицентров землетрясений Мира

В 1938 г. японским сейсмологом К. Вадати были впервые намечены по расположению очагов землетрясений сверхглубинные разломы вдоль границ островных дуг и глубоководных желобов.

В 1946 г. русский петролог А.Н. Заварицкий установил закономерную приуроченность к ним очагов андезитовых вулканов.

В 1954 г. Хуго Беньоф опубликовал работу по выявлению пространственной структуры «фокальных зон» глубокофокусных землетрясений, после которой эти исследования получили наибольшую известность. Гипоцентры землетрясений вытягивались по наклонным (под углом 30, 45, 60 градусов) поверхностям (фокальным поверхностям), погружающимся в недра Земли. Эта область фокусов землетрясений, называемая зоной Заварицкого-Беньофа, связывается с областью погружения океанской коры, прерывистое пододвигание которой и является причиной землетрясений (рис.24а).

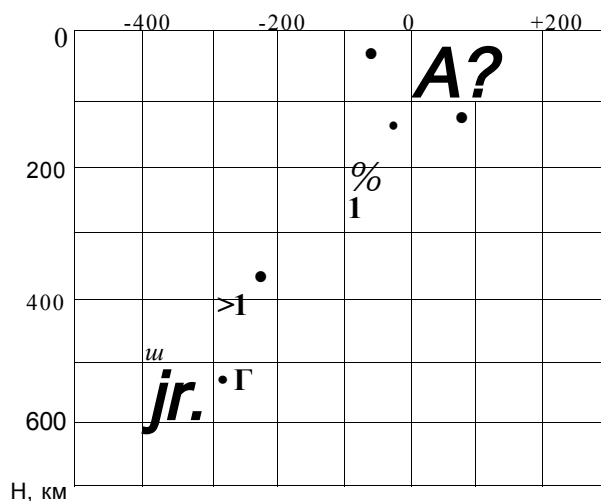


Рис. 24а. Гипоцентры землетрясений, происшедших в 1965 г. под дугой Тонга в юго-западной части Тихого океана (Болт, 1981)

По современным данным литосфера состоит из семи крупных плит, ограниченных зонами спрединга, субдукции или сдвига: Тихоокеанской, Северо- и Южно-Американской, Индоаравийской, Африканской, Евразийской, Антарктической. Имеется несколько менее крупных плит, существование которых принимается многими исследователями: Кокос, Карибская, Аравийская, Филиппинская, Сомалийская и др. Некоторое число других еще более мелких плит выделено на основе тектонических предпосылок в различных сложных регионах Мира: Иране, Красном и Средиземном морях, Калифорнийском заливе, море Бисмарка, Каспийском море и т.п. (рис. 24б).

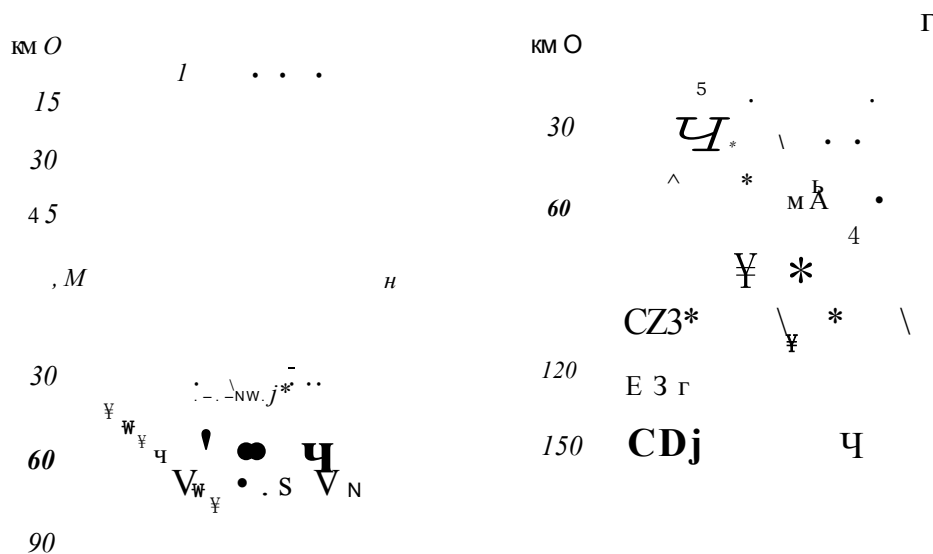


Рис. 246. Профили через: а - Рионскую низменность; б - вкост простираия восточной части Большого Кавказа; в - вкост простираия Апшеронского порога на Каспии (Халилов и др., 1987)

1 - гипоцентры землетрясений; 2 - осредненная поверхность Мохо; 3 - зона Беньофа

Лишь немногие из субдукционных или поддвигающих зон достигают глубин порядка 600-700 км: Тонга, Япония, Чили, Индонезия, Филиппины, Новые Гебриды и Соломоновы острова. Другие зоны поддвига достигают меньших глубин. Около 80% землетрясений соответствуют субдукционным границам Тихоокеанской плиты и примыкающих к ней главных плит. Остальная часть сейсмической активности проявляется вдоль границ плит, протягивающихся в сложной последовательности от Гималаев в Центральную Азию и Китай, и далее к западу через Афганистан, Иран, Турцию и Средиземное море к Азорским островам. Менее 3% сейсмической энергии высвобождается в пределах срединно-океанских поднятий и во внутренних частях плит. Практически 99% всех землетрясений приурочено к границам плит (Ломниц, Розенблуд, 1981).

Обобщение результатов исследований, проведенных Л.М. Балакиной (1967), А.А. Введенской, Л.А. Мишариной и Е.И. Широковой (1967) на основе наблюдений над сильнейшими землетрясениями Мира, показывает, что ориентация главных осей в поле упругих напряжений Земли соответствует простираию основных тектонических структур, и области однотипного состояния имеют планетарные размеры. Причем все рифтовые зоны характеризуются напряжениями горизонтального растяжения, направленными вкост простираия указанных тектонических элементов (Балакина, 1967; Мишарина, 1967).

2.2.2. Магматические вулканы

В настоящей работе авторами, вместо термина вулканы, введен термин магматические вулканы, с целью исключения путаницы при их совместном рассмотрении с грязевыми вулканами.

Как уже отмечалось, магматические вулканы в подавляющем большинстве расположены на границах литосферных плит, и, следовательно, их генезис непосредственно связан с процессами, происходящими в пределах рифтовых зон, зон субдукции и островных дуг.

Еще в 60-х годах прошлого столетия Г. Лояль писал: «Первичные причины вулканов и землетрясений, по большей части, одни и те же и должны иметь связь с выходом теплоты из внутренности Земли к поверхности».

Как отмечал С.А. Федотов (1964), «в глобальном смысле землетрясения и вулканы существуют совместно».

«О прямой связи между сейсмичностью и современным вулканизмом Курило-Камчатской складчатой области можно говорить лишь в том смысле, что они проявляются в одной и той же структурной зоне. При более детальном рассмотрении между ними устанавливается обратная зависимость» (Горячев, 1966). К такому же выводу приходит Г.П. Горшков (1957).

Как отмечено в работе Г.П. Горшкова (1984), вулканические землетрясения обычно предваряют вулканическое извержение (иногда за много времени), постепенно частота их увеличивается, так что происходит непрерывное «дрожание» тела вулкана непосредственно перед извержением. В пространстве их эпицентры не уходят далеко от вулканического аппарата, их очаги очень неглубоки, иногда заполняют тело вулкана выше его подножия. «Сейсмическая активность развивается постепенно, число и энергия землетрясений в процессе роя плавно возрастают, а извержение происходит на фоне максимального уровня сейсмической активности» (Зобин, 1979).

Теория тектоники литосферных плит внесла новые представления о генезисе магматических вулканов. Так, образование и деятельность магматических вулканов, в соответствии с тектоникой плит, непосредственно связываются с процессами спрединга и субдукции.

И.И. Абрамович и др. (1984) путем расчетов получили достаточно простую аналитическую зависимость вулканической активности островных дуг от термических и динамических параметров зон субдукции. Вулканическая активность растет с увеличением скорости схождения плит и степени сжатия, но при достаточно большой величине скорости сходящихся плит, в силу возрастающего сжатия литосферы и сокращения ее проницаемости, вулканическая активность островных дуг начинает уменьшаться.

Считается, что области питания вулканов - магматические очаги располагаются в астеносфере. Так, по мнению Д. Шимозуру, в астеносфере имеется жид-

кая фаза (силикатный расплав), объем которой оценивается 11-15% от общего объема вещества астеносферы.

Если рассматривать вулканизм рифтовых зон, то в качестве классического примера можно привести Исландию, представляющую собой выступающую над океаном часть срединно-океанского хребта.

На основе данных сейсмологии установлено, что под вулканами Исландии имеется низкоскоростная зона, уходящая на глубину до 250 км.

Источники магматического питания в зонах субдукции располагаются на больших глубинах. Так, аномально низкие значения сейсмических волн соответствуют фокальной зоне, расположенной под Курильской островной дугой.

Х. Раст (1972) предлагает классифицировать магматические вулканы по геодинамическим признакам на следующие типы:

1. Вулканизм океанских рифтовых зон

Преимущественно толеитовый эффузивный подводный вулканизм срединно-океанских хребтов, а также вулканизм расположенных на них островов, таких как, например, Исландия или Азорские о-ва.

2. Океанский внутриплитный вулканизм

Преимущественно эффузивный толеитовый, до щелочно-базальтового, подводный вулканизм океанских бассейнов (подводные горы, гайоты и т.д.), а также вулканизм островов, удаленных от рифтовых зон, как, например, Гавайи, острова Зеленого Мыса, Кергелен.

3. Вулканизм зон субдукции и связанных с ними краев плит

Смешанный эксплозивно-эффузивный вулканизм от основного до кислого, но, преимущественно, среднего состава. Примеры: все вулканы западного края Американского и восточного края Азиатского материков, а также прилежащих островных дуг («Тихоокеанский огненный пояс»), вулканы области Средиземного моря.

4. Материковый рифтовый вулканизм

Смешанный эксплозивно-эффузивный вулканизм, щелочно-базальтовый с высоким содержанием фонолитовой или трахитовой составляющей. Примеры: вулканы грабенов Восточной Африки, гора Камерун.

Вулканы зон субдукции генетически связаны с процессом субдукции.

Вулканизм океанских рифтовых зон по современным представлениям генетически связан с процессом разрастания океанского дна (спрединга). Вулканы океанских рифтовых зон расположены в планетарных поясах растяжения литосферы.

Океанский внутриплитный вулканизм связан с внутренними частями литосферных плит в пределах земной коры океанского типа. Океанские внутриплитные цепи вулканов отличаются от срединно-океанических хребтов своей асейсмичностью. Они широко распространены в Тихом, Индийском, Атлантическом океанах. В западной части Тихого океана они приурочены к цепи архипелагов Самоа - Маршалова - Каролинского - Кука - Тубуаи - Туамоту, в центральной - к

подводному вулканическому хребту Императорских гор, который продолжается в Гавайском архипелаге и в цепи Полинезийских Спорад (острова Лайн).

Генезис океанских внутриплитных вулканов до сих пор до конца не выяснен, однако имеется ряд гипотез, объясняющих их происхождение, наиболее популярной из которых является гипотеза горячих точек Т. Вильсона, предложенная им в 1963 г.

Континентальный рифтовый вулканизм генетически связывается с процессом зарождения зон спрединга и, так же как и океанский рифтовый вулканизм, отражает процессы растяжения литосферы. Как отмечает Х.Раст (1972), не может быть никаких сомнений, что Восточно-Африканские грабены непосредственно связаны с рифтами срединно-океанских хребтов. Хотя эти континентальные рифты и являются непосредственным продолжением срединно-океанских, они, однако, принципиально отличаются от последних тем, что продукты вулканизма в них не являются толеитовыми, а крайне изменчивы по составу.

22.3. Грязевые вулканы

Грязевой вулканизм на протяжении многих лет привлекает внимание ученых. Грязевые вулканы находятся в тектонически активных областях нашей планеты. Примечательно, что в Кавказско-Копетдагском регионе расположено более половины всех грязевых вулканов мира.

Исследованием грязевых вулканов занималось несколько поколений геологов, начиная со времен Г.В. Абиha (1939).

В двадцатом столетии грязевые вулканы изучали И.М. Губкин, С.А. Ковалевский, С.Ф. Федоров, П.П. Авдусин, А.А. Якубов, Ш.Ф. Мехтиев, А.А. Ализаде, Г.А. Ахмедов, В.А. Горин, З.А. Буниат-заде, П.Н. Кропоткин, Б.М. Валяев, С.Г. Салаев, Д.А. Агаларова, А.Л. Путкарадзе, Г.Т. Овнатанов, Ф.Г. Дадашев, М.М. Зейналов, А.К. Алиев, Н.О. Назаров, Р.Р. Рахманов, В.С. Мелик-Пашаев, Н.Ю. Халилов, М.Г. Агабеков, А.В. Зайцев, М.К. Калинин, И.М. Сирык, Е.Ф. Шнюков, Т.П. Эбралидзе и др.

В геологическую литературу термин «грязевой вулкан» вошел благодаря работам Г.В. Абиha, крупнейшего исследователя геологии Кавказа. Г.В. Абиh пришел к выводу, что для проявления грязевого вулканизма на поверхности Земли тепло дает магма; обломочную породу для сопочной брекчии - зона разлома; воду - море; газ - битуминозные породы; импульсы для начала грязевулканической деятельности - землетрясения. Грязевые вулканы, по Г.В. Абиху (1939), образовались по тем же законам динамики, что и магматические вулканы. Впоследствии эту идею развил С.А. Ковалевский, который считал, что грязевой вулканизм представляет собой эмбриональную форму магматических вулканов. Наиболее обстоятельно исследовавший грязевые вулканы И.М. Губкин (1938) и его последователи П.П. Авдусин, С.Ф. Федоров, А.А. Якубов (1938) и др. счита-

ли, что грязевые вулканы связаны с нефтяными месторождениями. В частности, И.М. Губкин подчеркивал, что диапировая структура, нефтяное месторождение и грязевой вулканизм - это триединая сущность единого целостного процесса геологического развития области погружения и опускания Кавказского хребта. При этом он отмечал, что грязевые вулканы, как правило, приурочены к осям антиклинальных поднятий.

Согласно представлениям этого ученого, к акчагыльскому времени в области развития диапировых складок обособление зон высокого и более низкого давления ушло настолько далеко, что пластичные глинистые массы, находившиеся под огромным давлением, двинулись в зоны слабого давления - в купола складок. Началось формирование диапировых структур путем выдавливания этих масс вверх, к ядрам складок, подток газа и воды, а потом и нефти. Размягчая породы ядра, вода под давлением газа поднималась вверх и выходила в виде газифицирующих источников на вершинах диапировых структур. Если приток газа не успевал компенсироваться его оттоком и накапливался в ядре, то давление здесь доходило до громадных величин. Создавшееся напряжение разряжалось взрывом и извержением газа, который, вырываясь наружу, мощной струей увлекал с собой куски разрушенного взрывом ядра и боковых пород.

По описанию очевидцев, извержение начинается внезапно с подземного гула или громоподобного грохота и через некоторое время после этого происходит выброс грязевулканической брекчии, состоящей из глинистой массы с обломками пород разного стратиграфического возраста, которая стекает по склонам вулкана в виде языков излияния. В большинстве случаев газ самовозгорается, с образованием столба пламени высотой в несколько сот метров (от 200-300 до 1000 м).

А.М. Керимов, Н.Ю. Халилов, Э.С. Балаев, Э.Н. Халилов, связывают генезис грязевых вулканов и диапировых структур с наличием в недрах земной коры аномально высоких пластовых (АВПД) и поровых (АВПоД) давлений. В соответствии с этим, авторы подразделяют грязевые вулканы на два генетически различных типа - газо-грязевые вулканы и собственно-грязевые вулканы, при этом газо-грязевые вулканы связываются с аномально высокими пластовыми давлениями, вызываемыми скоплением газа (рис. 25), а собственно-грязевые вулканы связываются с аномально высокими поровыми давлениями мощных толщ пластичных глинистых масс (рис. 26). Вулканы второго генетического типа встречаются редко, однако наличие их свидетельствует о том, что механизм образования и проявления грязевых вулканов не всегда связан с деятельностью газов.

К числу таких вулканов относятся Хамамдаг, Котурдаг, Бузовны, Кумани и др. Извержение их сопровождается выжиманием на дневную поверхность брекчированных жидко-твердых глинистых образований, а на шельфе Каспийского бассейна приводит к образованию небольших островов и банок, которые быстро размываются морскими водами.

Некоторые ученые (Ш.Ф. Мехтиев, П.Н. Кропоткин, Б.М. Валяев, И.А. Лагунова) связывают генезис грязевых вулканов с процессами дегазации верхней

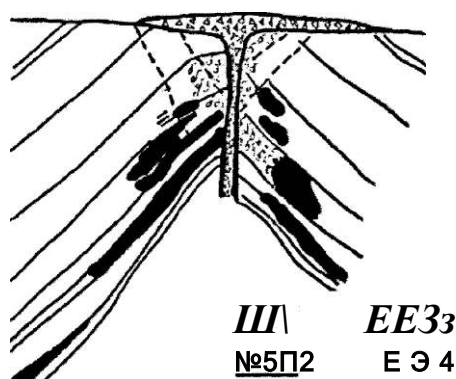


Рис. 25. Геологический профиль через газо-грязевой вулкан Локбатан (по А.А. Якубову) (первый генетический тип)

1 - грязевулканическая брекчия; 2 - нефтяная залежь; 3 - газовая залежь; 4 - тектонические нарушения

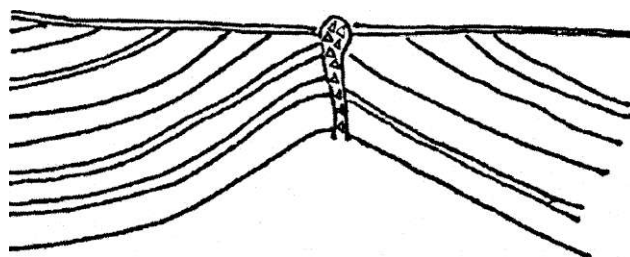


Рис. 26. Геологический профиль через собственно-грязевой вулкан Бузовнинская сопка (по А.А. Якубову) (второй генетический тип)

мантии. В подтверждение своих доводов вышеуказанные исследователи приводят анализы химического и изотопного состава брекчии, вод и газов грязевых вулканов. В своих исследованиях Ш.Ф.Мехтиев и П.Н. Кропоткин указывают на то, что брекчия и воды активных грязевых вулканов сильно обогащены литием и бором, вынесенным из глубинных слоев Земли. Кроме того, исследования газов позволили установить в них повсеместное присутствие двуокиси углерода, аргона и гелия, а в ряде вулканов и паров ртути.

Таким образом, становится очевидным, что генезис грязевых вулканов, так же как и вопрос происхождения нефти, все еще остается предметом споров в геологической науке.

Теория тектоники литосферных плит позволяет с принципиально новых позиций подойти к проблеме генезиса грязевых вулканов и диапировых складок.

Все исследователи грязевого вулканизма считают одним из необходимых условий для образования грязевых вулканов большую мощность осадочного слоя (Якубов, 1978). Другим условием является значительная дислоцированность складок, нарушенных разрывами. Третьим необходимым условием, по мнению ряда исследователей (А.М. Керимова, Н.Ю. Халилова, Э.Н. Халилова), следует считать наличие в недрах зон аномально высоких пластовых (АВПД) и поровых (АВПоД) давлений.

На четвертом условии следует остановиться несколько подробнее. Этим условием является повышенная сейсмичность.

На связь извержений грязевых вулканов с землетрясениями указывал еще Г.В. Абих. Впоследствии связь грязевого вулканизма с сейсмичностью упоминалась в работах А.А. Якубова, А.А. Алиева и др.

Так, например, через 10-15 минут после Шемахинского (1902 г.) землетрясения произошло извержение вулкана Шихзагирлы, а извержение грязевого вулкана Голубицкого на Тамани совпало с подземными толчками в г. Екатеринодаре (ныне г. Краснодар). В 1927 г. извержение Джау-Тепе произошло одновременно с крымским землетрясением. Таких примеров можно привести множество. Однако существует мнение, что в районах развития грязевулканических очагов сейсмическая активность обычно значительно слабее (до 3-4 баллов), чем за пределами этих районов (до 5-7 баллов). Это объясняется тем, что грязевые вулканы как бы снимают напряжения в земной коре (Якубов, 1978). Так, Р.А. Агамирзоев на примере Кобыстанской области пришел к выводу, что грязевые вулканы, а точнее пластичные глинистые массы питающие их, гасят упругую энергию землетрясений, являясь своего рода «амортизатором» сейсмических толчков.

Проведенные Ш.Ф. Мехтиевым и Э.Н. Халиловым (1983) исследования позволяют сделать вывод, что все без исключения грязевые вулканы расположены в зонах повышенной сейсмичности. Примечательно, что подавляющее большинство этих зон характеризуются наличием глубокофокусных (подкоровых) землетрясений.

Сравнение карты грязевых вулканов Мира с картой сейсмических поясов привело к поразительным результатам. Практически все грязевые вулканы расположились вдоль сейсмических поясов, причем тех поясов, которые отражают зоны субдукции (зоны Заварицкого-Беньофа).

К.А. Аникеев указывает, что глобальные геодинамические пояса АВПД выделяются своей высокой сейсмичностью, вулканизмом, интенсивными изостатическими аномалиями, разбуханием, разуплотнением и расплавлением вещества астеносферы, высокими тепловыми потоками, высокой гидротермальной активностью.

Исходя из вышеуказанного, можно сделать вывод, что высокая сейсмичность также является основным условием для образования грязевых вулканов.

Зоны субдукции характеризуются всеми четырьмя указанными условиями, необходимыми и достаточными для образования грязевых вулканов и диапировых складок.

Зоны субдукции характеризуются аномально большими мощностями осадочного слоя. Так, например, в Тихом океане выделяются две биполярно расположенные зоны с минимальными скоростями седиментации в 1-3 мм/1000 лет, которые соответствуют положению северной и южной аридных зон, в то время как по экватору вытянута гумидная зона, в пределах которой скорости седиментации возрастают до 10-30 мм/1000 лет.

Исходя из мощности осадочного слоя Южно-Каспийской впадины, скорость осадконакопления здесь доходит до 6000 мм/1000 лет (Горбачев, 1979).

Рассмотрим механизм осадконакопления в зонах субдукции при тех же скоростях седиментации.

Известно, что средняя мощность осадочного слоя на дне океанов составляет около 600-800 м. При погружении океанской коры под материковую в зоне субдукции соскабливается большая часть осадков, скапливаясь в глубоководном желобе.

При погружении 500 км океанской коры с осадочным слоем мощностью 700 м утолщение его за счет соскабливания и сжатия в зоне субдукции будет составлять около 8 км. Если же учесть неровности края материковой плиты, то можно допустить срезание отдельными ее частями большего или меньшего количества осадков и, следовательно, варьирующее в определенных пределах утолщение осадочного слоя в разных частях глубоководного желоба. Сжатие осадков в глубоководных желобах сопровождается складкообразованием и многочисленными разрывами. Подобным механизмом осадконакопления можно объяснить аномально большую мощность осадочного слоя в глубоководных желобах зон субдукции. Рассмотренная выше модель основана на предположении однородности слоя. Если же принять во внимание многослоистость и сложность строения среды, то картина значительно усложняется. Если даже упустить из внимания различие физико-механических свойств, то очевидно, что мощность более толстых слоев будет расти при сжатии значительно быстрее мощности тонких слоев, залегающих над толстыми, а это, в свою очередь, приведет к протыканию толстыми слоями тонких (рис. 27). С образованием диапировых структур или собственно-грязевых вулканов. В глубоководном желобе соскабливается и сжимается слой осадков, но при этом осадконакопление продолжается, вследствие чего более молодые слои оказываются значительно менее уплотненными, чем нижележащие. Поэтому, в то время как нижележащие уплотненные слои изменяют объем при сжатии незначительно, более молодые слои имеют возможность еще и уплотниться, вследствие чего их мощность растёт значительно медленнее.

Таким образом, нижележащие слои, опережая в росте более молодые слои, протыкают их, образуя диапировые структуры. Если эти слои представляют из себя неуплотненные глинистые толщи, то, протыкая вышележащие, они выжима-

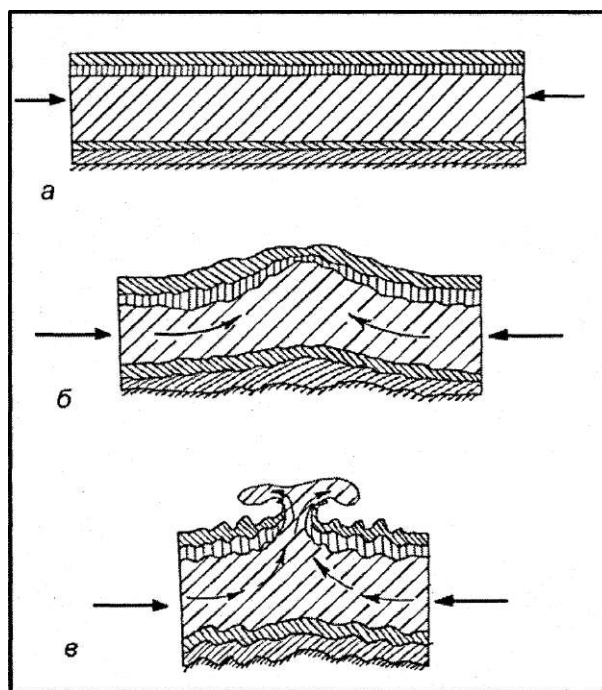


Рис. 27. Механизм образования собственно-грязевых вулканов и диапировых структур

а - начальная стадия сжатия многослойного пласта, в разрезе которого имеется мощный вязко-пластичный слой; б - утолщение и деформация слоев в результате сжатия; в - разрыв вышележащих тонких слоев вследствие опережения роста мощности вязко-пластичного слоя, выпирание вязко-пластичной массы на поверхность и образование собственно-грязевого вулкана

ются на поверхность, образуя собственно-грязевые вулканы. В том случае, когда сжимаются пласты-коллекторы, насыщенные флюидами, это приводит к повышению аномально высоких пластовых давлений, а сейсмические волны, возникающие при землетрясениях, служат толчком к нарушению сложившегося гидродинамического равновесия и разрыву сплошности пород, что, в свою очередь, вызывает разрядку напряжений с образованием газо-грязевых вулканов.

Наличие грязевых вулканов и диапировых структур в Кавказско-Копетдагском регионе может быть объяснено с помощью рассмотренного механизма. В пользу вышеизложенной модели говорит и тот факт, что грязевые вулканы в Каспийском регионе расположены вдоль выявленной зоны субдукции (рис. 28) (Халилов, 1987).

Впервые на наличие диапировых структур на Апшеронском полуострове указал П.Е. Волярович в 1909 г. В 1914 г. И.М. Губкин установил наличие диапировых структур в районах северо-западного Апшерона; почти одновременно с ним Н.И. Ушейкин подобные складки отметил на юго-западе Апшерона. Наиболее

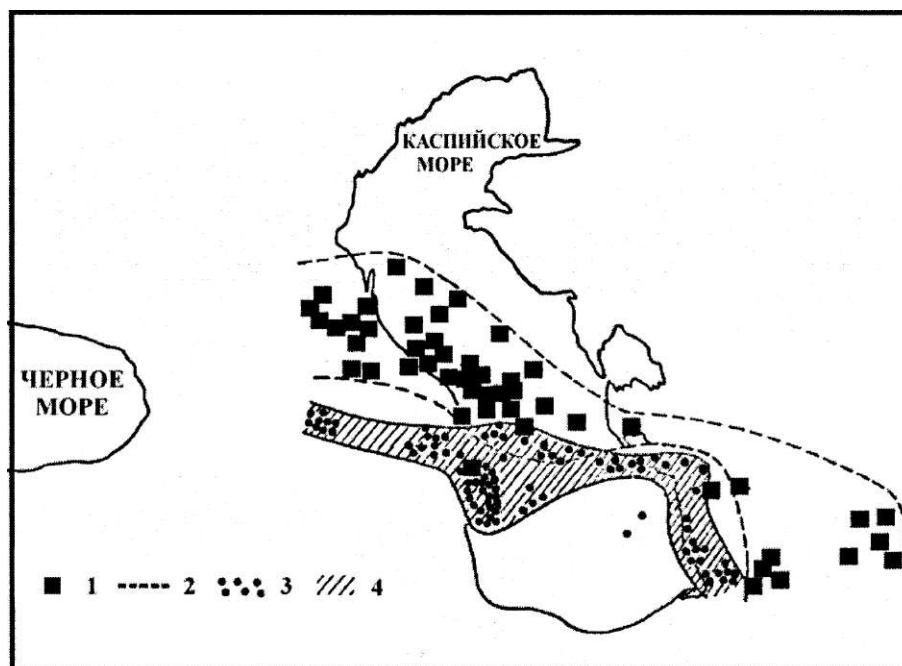


Рис. 28. Схема расположения грязевых вулканов и эпицентров глубоководных землетрясений сейсмофокальной плоскости Кавказско-Копетдагского региона

1 - эпицентры глубоководных землетрясений (с глубиной гипоцентров 40 км и более); 2 - зона расположения эпицентров глубоководных землетрясений; 3 - грязевые вулканы; 4 - зона распространения грязевых вулканов

полно и глубоко вопросы диапиризма получили освещение в работе И.М. Губкина по тектонике Юго-Восточного Кавказа.

Так, В.С. Котов на материалах по месторождениям Краснодарского края пришел к заключению, что в регионально-водоносных комплексах АВПД вообще не могут формироваться, так как во всех случаях скорость оттока вод с избытком компенсирует возможное повышение пластового давления.

Таким образом, в тех глинистых толщах, где отток вод значительно опережает осадконакопление и возможное повышение порового давления, АВПД возникает вследствие одновременного сжатия этих пластов в зонах субдукции.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Для образования грязевых вулканов и диапировых структур необходимы и достаточны четыре условия:

- а) большая мощность осадочного слоя;
- б) значительная дислоцированность складок, нарушенных разломами;
- в) наличие в недрах АВПД и АВПоД;
- г) высокая сейсмическая активность.

2. Наиболее благоприятными для образования грязевых вулканов и диапировых структур являются зоны субдукции, характеризующиеся всеми четырьмя условиями.

3. Развитие грязевых вулканов и диапировых структур в Каспийском регионе необходимо рассматривать как следствие субдукционного взаимодействия литосферных плит.

2.3. ЦИКЛИЧНОСТЬ В ПРОЯВЛЕНИЯХ ВУЛКАНИЗМА И СЕЙСМИЧНОСТИ

2.3.1. Современная вулканическая активность

Изучением особенностей современной вулканической активности отдельных регионов и Земли в целом занимались различные исследователи. На основании статистических исследований изменения числа извержений вулканов Мира с 1901 года по 1964 год В.И. Влодавец (1966) выделил четыре крупных цикла активизации вулканов с периодами от 11 до 19 лет.

В работе А.Н. Земцова и А.А. Тронь (1985) на основании спектрального анализа временных рядов извержений вулканов Мира, по данным каталогов Н.И. Гущенко (1979) и Т. Симкина (Simkin et al., 1981), сделана попытка выявления скрытой периодичности. За период с 1900 по 1970 г.г. отмечено наличие 22-летнего цикла вулканической активности. На существование 22-летнего цикла вулканической активности указывали также в своих работах Г.П. Тамразян (1958, 1959) и Е.В. Максимов (1968).

Надо отметить, что еще в работах Г.П. Тамразяна и Е.В. Максимова делалась попытка выявления циклов активизации грязевых вулканов Азербайджана. В частности, ими отмечается наличие 1-2 летних, 11-летних, 22-летних, 50-летних, 60-летних и 80-летних циклов. Такое большое число выделенных циклов, на наш взгляд, связано с несовершенством применяемого математического аппарата, основанного лишь на сглаживании исходных временных рядов скользящими трехлетними интервалами. Ранее попытки выявления закономерностей в извержениях грязевых вулканов были сделаны в работах В.А. Горина, С.А. Ковалевского, Н.В. Малиновского.

Так, Н.В. Малиновский (1943) обращал внимание на одинаковые периоды времени между двумя последовательностями извержений двух пар вулканов: Булла-Лось - 47 лет, Глиняный и Кумани - 66 лет. В.А. Горин (1952) отметил перемещение активности грязевых вулканов по площади с поочередным охватом северных и южных участков области своего распространения.

Впоследствии закономерности в активности грязевых вулканов Азербайджана изучались в работах Я.А. Гаджиева, В.А. Горина, Р.Р. Рахманова. Закономер-

ности в извержениях грязевых вулканов Мира были рассмотрены впервые в работах В.Е.Хаина, Ш.Ф.Мехтиева, Э.Н.Халилова, Т.А. Исмаил-заде.

В работе Н.И. Гущенко (1985) отмечено наличие определенной цикличности в извержениях магматических вулканов. Автором работы выделяются циклы с периодами: 1 год, 5-6 лет, 23 года, 60-90 лет и 180 лет. На основе проведенных исследований делается долгосрочный прогноз вулканической активности до 2312 года (Гущенко, 1985).

Н.И. Гущенко (1983) был проведен статистический анализ извержений вулканов, как в целом по Миру, так и по широтным поясам. В работе сделана попытка оценить энергию извержений вулканов. В качестве вспомогательной оценочной единицы вулканической активности (ЕВА) был использован период покоя вулкана перед извержением, подсчитанный в годах от конца предыдущего извержения. ЕВА равна одному году покоя вулкана перед извержением. Установлено существование определенной зависимости между количеством извергнутого материала и периодом покоя вулкана: чем длительнее период покоя, тем больше количество извергнутого материала. По уровню вулканической активности в течение XIX—XX вв. выделено семь широтных поясов, устойчивых во времени. По размещению голоценовых вулканов Н.И. Гущенко выделено девять поясов активности от 88° с.ш. до 88° ю.ш. Центр каждого из поясов характеризуется сгущением числа вулканов, большой частотой извержений и большей энергией извержений при пересчете на один условно действующий вулкан.

Ряд зарубежных исследователей (Chance, Kelly, 1979) сделали попытку установить закономерности в извержениях вулканов по изменениям концентрации вулканической пыли в атмосфере. Однако такой подход, на наш взгляд, не только не позволяет установить самостоятельную закономерность в активизации различных геодинамических типов вулканов, но и искажает пространственную картину вулканической активности, что связано с перемещением воздушных масс в атмосфере.

Проводя исследования вулканической активности, М. Рампино выделил цикличность в извержениях вулканов с периодом 18,6 лет (1985).

Советские и зарубежные исследователи также делали попытки выявления связи между солнечной активностью и периодичностью извержений вулканов (В.Е.Хаин, Ш.Ф.Мехтиев, Э.Н.Халилов, Я.А. Гаджиев, Г.П. Тамразян). Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в следующих разделах.

2.3.2. Современная сейсмическая активность

Сейсмичность так же, как и вулканизм, является наиболее чутким индикатором изменения современной тектонической активности различных регионов Земли. Изучение пространственно-временных закономерностей в проявлениях современной сейсмической активности позволяет решать как проблемы прикладно-

го значения, например, прогноза землетрясений, сейсмического районирования, проектирования сейсмостойкого строительства, так и теоретические, например, выяснения степени взаимосвязи процессов сейсмичности, вулканизма, изменения угловой скорости вращения Земли, солнечной активности, структуры земной коры, с целью выяснения общей картины геодинамики.

Одной из наиболее ранних работ, в которой отмечена определенная цикличность в землетрясениях, является каталог землетрясений Российской империи, составленный в 1893 году И.В. Мушкетовым и А. Орловым. Так, в этой работе отмечено, что «все имеющиеся сведения, по-видимому, указывают на тот весьма любопытный факт, что существуют особенные эпохи, весьма обильные сильными и разрушительными землетрясениями почти на всей поверхности Земли. Таким образом, например, в 1778, 1821, 1822 и 1868 г.г. они в большом количестве следуют одно за другим в течение весьма короткого промежутка времени, причем обнаруживается как бы правильная периодичность между эпохами максимума».

24. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВУЛКАНИЗМА И СЕЙСМИЧНОСТИ

24.1. Методические основы математической обработки и анализа временных рядов

Изучение геологических, геофизических и космологических процессов в пространстве и во времени требует применения специального математического аппарата, включающего элементы теории вероятностей, математической статистики и математического моделирования. Одной из наиболее распространенных черт природных явлений является периодичность. Однако обычно временные ряды, отражающие изменение во времени того или иного процесса, характеризуются наличием существенного "шума". В результате этого, выявление скрытой периодичности в геологических, геофизических и космологических процессах является сложной и важной задачей. В ряде случаев задача выявления скрытой периодичности осложняется тем, что анализируемый временной ряд имеет длину, сравнимую с периодом одной из предполагаемых компонент.

Выявление скрытой периодичности может производиться двумя различными методами - посредством линейного преобразования исходного ряда, например, методом усреднения процесса за пробный период или методом скользящей средней, либо корреляционными методами выявления скрытых периодичностей (Деч, Кноринг, 1985; Халилов, 1986, 1987).

При обработке статистической информации об извержениях вулканов и землетрясениях необходимо учитывать, что массив данной информации (генеральная совокупность) представляет собой большую стохастическую систему. Развитие стохастических систем, как известно, подчиняется вероятностным законам. Это значит, что прослеживаемые тенденции сопровождаются случайными отклонениями в ту или иную сторону от общего тренда. Это объясняется тем, что на рассматриваемые процессы в большей или меньшей степени оказывает влияние огромное множество факторов, как земных, так и космических. К ним относятся: изменение тектонической активности Земли, вызванное внутренними физико-химическими процессами; расположение Земли в различных участках галактической орбиты; расположение планет относительно Земли и Солнца; лунно-солнечные приливы; солнечная активность, и т.д. Поэтому графики изменения во времени реальных чисел рассматриваемых параметров представляет собой ломаную линию со значительными резкими колебаниями, на фоне которых прослеживается общий тренд.

Как уже было отмечено выше, ошибки в определении исследуемых параметров, например, количества извержений вулканов или землетрясений, носят некоррелированный, стохастический характер. Тогда они, как и всякий шум, могут быть отфильтрованы простым линейным преобразованием исходного ряда.

Преобразованием такого типа является, например, сглаживание исходного ряда последовательно t - летними, sr - летними и т.п. скользящими средними. Под термином "сглаживание t - летними скользящими средними" здесь и далее понимается процедура усреднения членов некоторого ряда $x(i)$ за пробный период $t=p+1$ (p - четное), в результате чего образуется ряд:

$$X_x(j) = \frac{1}{p+1} \sum_{i=j-T/2}^{j+T/2} x(i) \quad (2.1).$$

Частотная характеристика линейного преобразования (2.1) для достаточно большого набора $x(i)$ имеет вид:

$$R_t(T) = \frac{\sin \pi f T}{\pi f T} \quad (2.2).$$

Линейное преобразование достаточно эффективно подавляет в исходном процессе все гармоники с периодом $T < t$.

Полученный ряд $X_x(j)$ можно далее сгладить ϕ -летними скользящими средними ($\phi=t+1$, где t - четное), в результате чего образуется ряд:

$$X_{\tau, r}(1) = \frac{1}{m+1} \sum_{j=1-m/2}^{1+m/2} X_{\tau}(j) \quad (2.3).$$

Коэффициент ослабления гармонической компоненты с периодом T в этом случае определяется как произведение $R^{\wedge T^{\wedge}} R(T)$.

Таким образом, линейное преобразование (2.1) позволяет выделить из рассматриваемого процесса низкочастотную часть спектра.

Так, в работах по выявлению скрытой периодичности в характере извержений различных геодинамических типов вулканов и землетрясений производилась фильтрация высокочастотного шума путем линейного преобразования методом скользящих средних, описанным выше. Для этого были использованы различные фильтры с разными интервалами сглаживания и различным числом интервалов в варианте сглаживания.

После обработки каждого варианта производится корреляция между различными сглаженными временными рядами с определением коэффициента корреляции. Затем осуществляется расчет в следующем варианте, с последующим определением коэффициента корреляции между полученными результатами в данном варианте и результатами в предыдущем варианте. Величина окна сглаживания и числа последовательных сглаживаний увеличивается в каждом последующем варианте.

Таким образом, сравнивая результаты сглаживания в каждом последующем варианте с предыдущим, можно судить об эффективности фильтрации «шумов» по увеличению коэффициента корреляции.

Казалось бы, что коэффициент корреляции, по мере возрастания величины окна и числа последовательного сглаживания, должен постоянно увеличиваться. Однако, как показали исследования, по достижении определенного значения коэффициент корреляции становится практически неизменным, а при дальнейшем увеличении величины окна сглаживания и числа последовательных сглаживаний коэффициент корреляции начинает уменьшаться. Это свидетельствует о том, что тот вариант сглаживания, при котором коэффициент корреляции имеет максимальные значения, является наиболее оптимальным и позволяющим установить истинный (устойчивый) характер анализируемого процесса (рис. 29).

Необходимо отметить, что в методах вскрытия периодичностей период искомой гармоникой не известен, а определяется в процессе исследования. Более того, процесс представляется в виде не периодической, а, скорее всего, почти периодической функции времени. Тем самым методы вскрытия периодичностей, по существу, позволяют решить проблему представления процесса в виде почти периодической функции.

Проблема вскрытия периодичностей считается решенной только в том случае, если найдены параметры периодической компоненты. Поэтому выделение

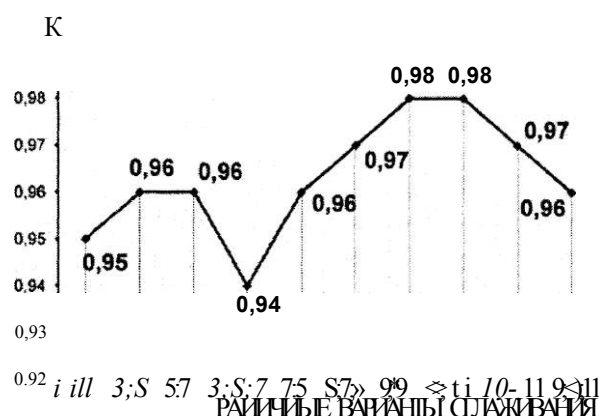


Рис. 29. График зависимости величины коэффициента корреляции от величины окна сглаживания и числа последовательных сглаживаний методом скользящей средней

K - коэффициент корреляции между предыдущим и последующим вариантами сглаживаний; по оси абсцисс указаны варианты последовательных сглаживаний методом скользящей средней

периодической функции $S(t)$ из исходного процесса $X(t)$ еще не решает полностью задачи. Если же такое выделение осуществлено достаточно полно, т.е. в преобразованном ряде искомая периодическая компонента выражена очень четко, так что можно считать $X^{(1)}(t) \sim S(t)$, то задача определения параметров сводится к обычному гармоническому анализу периодической функции.

С другой стороны, задача определения параметров может быть решена с помощью так называемого периодограммного анализа, впервые рассмотренного Стоком в 1877 году. Эти же идеи лежат в основе методики, разработанной Ланцошом.

Одновременно с линейным преобразованием исходных временных рядов методом скользящей средней, целесообразно анализировать временные ряды спектральными методами.

Как уже указывалось, анализируемый процесс всегда задается на некотором конечном интервале $(-L, L)$, и результат корреляционного преобразования не точно совпадает с корреляционной функцией. Построение преобразования Фурье от $X^{(1)}(t)$ дает лишь оценку спектральной плотности (Серебренников, Первозванский, 1965).

Если анализируемый процесс $X(t)$ действительно является чисто полигармоническим, т.е.:

$$X(t) = \sum_{j=1}^v A_j \cos w_j t \quad (2.4),$$

то такая оценка является достаточно хорошей при большой продолжительности интервала обработки.

Рассмотрим вопрос об эффективности выявления скрытых периодичностей указанным методом при наличии «шумовой» компоненты. Построение приемлемых оценок при этом существенно осложняется в связи с тем, что наличие $X(t)$ сколь угодно близких гармонических компонент приводит к тому, что условие

$$|w_j - W_j| \leq a^{\text{гм}} \quad (2.5.)$$

при конечном «а» не выполняется, и амплитуда любой гармоники в $X^{(1)}(t)$ является результатом наложения других гармоник. Кроме того, наложение бесконечно малых гармоник, содержащихся в $p(t)$, может привести к появлению в $U_1^*(w)$ пиков конечной высоты, трудно отличимых от пиков, даваемых непосредственно выявленными гармониками (Серебренников, Первозванский, 1965).

В том случае, когда в силу исходных физических соображений неясно, действительно ли процесс $X(t)$ содержит чисто гармонические компоненты, появление в $U_1^*(w)$ пиков конечной высоты еще не дает достаточных оснований для утверждения о существовании таких гармоник (Серебренников, Первозванский, 1965).

Как указано в цитируемой работе, флуктуационный характер несглаженных оценок спектральной плотности вызывает определенные трудности при выявлении скрытых периодичностей, поскольку «шумовая» компонента с непрерывным спектром может дать флуктуации, неотличимые на первый взгляд, от пиков, вызываемых наличием гармонических компонент. С другой стороны, сглаживание флуктуаций приводит к сглаживанию пиков. Таким образом, появляется необходимость различения пиков, вызываемых наличием только «шумовой» компоненты, от пиков, отражающих наличие гармоник. В то же время, эта проблема может быть решена при определенных и достаточно ограниченных предположениях о характере «шумовой» компоненты.

Проблема различения пиков в периодограмме заключается фактически в решении вопроса: содержит ли исследуемый процесс действительно гармоническую компоненту с некоторой частотой или же наложение случайных факторов привело к появлению в данном участке реализации компоненты со свойствами, близкими к такой же гармонической функции.

Не останавливаясь подробно на сущности метода максимальной энтропии ММЭ, отметим, что в настоящее время, на наш взгляд, он является наиболее простым и распространенным в различных областях науки и техники при исследованиях полигармонических процессов (Деч, Кноринг, 1985; Киселев, 1980).

Дж. Бург в 1967 году предложил рекурсивный метод решения системы уравнений, входящих в матрицу автокорреляций, используемую в ММЭ.

Использование ММЭ для анализа временных рядов, как указано в работе Н.М. Ротанова (1982), целесообразно по той причине, что он дает возможность

выявить скрытые периодичности, оценивая наиболее точно их частоты, и на реализации ограниченной длины разделить близкие по частоте пики в спектре, что нельзя получить обычным спектральным методом.

Приведенные в работе В.Ф.Писаренко (1973) результаты исследований показали, что ММЭ во многих случаях обладает большой разрешающей способностью и минимальным смещением по частоте.

В то же время при использовании ММЭ возникают проблемы, связанные со смещением в спектральных линиях, появлением неустойчивости, выбором оптимальной длины фильтра. Изучение этих вопросов проводилось как на модельных (Писаренко, 1973), так и на геофизических полях (Ротанова, 1982). Нахождение параметра авторегрессии M (длины фильтра) является чрезвычайно важным как для ММЭ, так и для классических методов вычисления спектральной плотности, и в настоящее время этот вопрос остается открытым (Ulrich, Clayton, 1976).

В то же время модельные расчеты В. Шен, проведенные им в 1974 году, показывают, что слишком малое M приводит к пересглаженному, а слишком большое - к неустойчивому спектру. Установлено (Ulrich, Clayton, 1976), что M не должно быть больше $N/2$.

Ряд исследователей считает, что спектр будет корректным, если $N/5 < M < N/2$. В.Ф. Писаренко (1973) приходит к выводу, что M должно быть в пределах $(0,3-0,5)N$.

Следующим важным вопросом при спектральном анализе временных рядов является влияние на полученные результаты длины исходного ряда N . Как отмечено в работе Н.М. Ротанова (1982), точнее всего получаются результаты при большей длине ряда и хуже - при меньшей.

Обычно при использовании методов спектрального анализа выделяют тренд, т.к. считается, что его содержание в данных наблюдений вносит в оценки корреляционных функций и спектральных плотностей определенные искажения. В частности, недостоверными могут оказаться оценки спектральных плотностей на больших периодах, сравнимых с длительностью рассматриваемого временного интервала. Кроме того, изучение тренда само по себе интересно для оценки амплитуд вариаций на определенных временных периодах, больших рассматриваемого интервала.

Для аппроксимации временных изменений поля Р. Курие (Currie, 1973) использовал полином первой степени, а В. Коуртилот и Ж. Ле Моуль (Courtillot, Le Moul, 1976) - полином второй степени.

Основную роль играет не аппроксимация гладкой части изменений поля полиномом, а степень полинома. Для ее определения можно воспользоваться методом конечных разностей в работе (Кендал, Стьюарт, 1976).

В процессе определения степени полинома, описывающего гладкую часть временного ряда, необходимо исключить возможность искажения оставшейся части, представляющей колебания относительно тренда.

Проведенные нами исследования временных рядов извержений вулканов показали, что удаление линейного тренда оказывает влияние на получаемый результат при применении ММЭ лишь в том случае, когда выделяемые гармоники сопоставимы с длиной исходного ряда. В случае же, когда длина исходного ряда значительно превышает периоды выделяемых гармоник, удаление тренда практически не оказывает на получаемые результаты никакого влияния, лишь несколько меняя значения амплитуд спектров. Кроме того, как справедливо указано в работе В.М. Киселева (1980), при удалении тренда не всегда ясно, что удаляется, а это может привести и к искажению результата.

Как указывалось выше, при выявлении скрытой периодичности в исходном процессе спектральными методами необходимо хотя бы иметь представление, в каких временных интервалах возможно выделение гармоник. Это важно, прежде всего, для выбора длины исходного временного ряда, т.к. длина ряда должна превышать периоды выделяемых гармоник, а длина фильтра, при расчете спектра методом максимальной энтропии, должна находиться в пределах 20-50% от длины исходного ряда (Киселев, 1980).

Поэтому методика установления скрытой периодичности заключалась в следующем. Сначала производилось сглаживание исходного временного ряда извержений вулканов и землетрясений методом скользящей средней при различных окнах сглаживания и различном числе последовательных сглаживаний. Затем выявлялся устойчивый характер исходного процесса, после чего определялись примерные периоды гармоник, составляющих этот процесс.

Зная примерные ряды гармоник, составляющих исходный процесс, длина ряда устанавливается значительно превышающей периоды этих гармоник (в 3-5 раз).

Необходимо также отметить, что изменение длины фильтра в пределах от 20% до 50% длины исходного ряда также оказывает определенное влияние на полученные результаты. В связи с этим в программе оценки спектральной плотности методом максимальной энтропии на основе алгоритма Бурга предусмотрено изменение длины фильтра с заданным шагом. То есть рассчитывается спектр при длине фильтра 20% от N , затем 25% от N , 30% от N (где N - длина ряда) и т.д., до 50% от N , с заданным шагом 5%. Шаг может меняться в зависимости от необходимости. Таким образом, имея рассчитанные спектры при всех возможных вариантах длины фильтра, можно исследовать характер изменения формы спектра и установить его характерные особенности, устойчиво сохраняющиеся при большинстве вариантов длины фильтра.

Как видно, применяемый нами принцип органично связал метод скользящей средней с ММЭ, что позволило повысить эффективность обоих методов при их совокупном применении.

Кроме того, метод скользящей средней позволяет рассмотреть динамику процесса в реальном масштабе времени, т.е. выделить периоды повышенной и пони-

женной вулканической (сейсмической) активности, приуроченные к конкретным датам. Этого не позволяет сделать спектральный метод. Между тем, спектральный метод (ММЭ) позволяет выделить более точно гармоники, составляющие данный процесс, а также те гармоники, которые могут выпасть из поля зрения исследователя или же могут быть сглажены в процессе линейного преобразования методом скользящей средней.

Необходимо иметь в виду также тот важный факт, что ни линейное преобразование МСС, ни спектральный метод ММЭ в отдельности не позволяют однозначно утверждать достоверность установленных гармоник. В то же время, применение обоих методов в совокупности (МСС и ММЭ) позволяет взаимно проверить результаты, полученные каждым из них в отдельности, и, в случае идентичности этих результатов, можно утверждать, что установленные гармоники достоверны.

24.2. Методические особенности установления корреляционной связи между различными периодическими процессами

К сожалению, во многих случаях применение методов математической статистики и математического анализа временных рядов слишком формализовано, что не позволяет выявлять истинные причинно-следственные связи и, зачастую приводит к ошибкам в оценке степени взаимосвязи тех или иных процессов.

Практически все реальные природные процессы, и, прежде всего, геологические, космологические и космогеологические, при взаимовлиянии, смещены во времени относительно друг друга. Поэтому при выявлении взаимосвязи в реальных природных процессах первичной задачей является не только выявление уровня корреляции между собой этих процессов, но и определение причинно-следственной связи между ними. Для примера можно привести влияние солнечной активности на сейсмичность Земли. Прежде всего, необходимо логически установить, что первично в этом взаимодействии: сейсмическая или солнечная активность. Естественно было бы предположить, что солнечная активность первична, и именно она может оказывать влияние на сейсмическую активность, а не наоборот. Такая логика продиктована разницей в масштабах энергетического проявления этих двух процессов, в которых выделяющаяся солнечная энергия несопоставимо превышает сейсмическую энергию Земли. Следовательно, при рассмотрении взаимосвязи этих двух процессов необходимо учитывать первичность солнечной активности как в самой системе этого взаимодействия, так и во временном аспекте, т.е. сначала повышается солнечная активность, а затем, спустя некоторое время - сейсмическая активность Земли.

В данном случае, промежуточным процессом между моментом повышения солнечной активности и повышением сейсмической активности, приводящим к

запаздыванию сейсмической активности по отношению к солнечной, является увеличение напряженного состояния земной коры.

В качестве другого примера можно привести взаимосвязь активности магматических вулканов рифтовых зон (типа Р), отражающих геодинамическую активизацию поясов растяжения и, как следствие, увеличение радиуса Земли, и графика вариаций длительности земных суток. В работе проведен анализ взаимосвязи этих графиков, показавший запаздывание увеличения длительности суток по отношению к активизации вулканов типа Р.

На рис. 30 показан фрагмент сопоставления графиков вариаций длительности земных суток и активности магматических вулканов типа Р.

Прямые 1,2...п наглядно демонстрируют степень запаздывания максимумов циклов вариаций длительности суток относительно максимумов активности вулканов типа Р. Отрезки, обозначенные а, б, с, показывают время запаздывания максимумов циклов одного процесса относительно другого. Как видно из рис. 30, время запаздывания максимумов циклов вариаций длительности суток относительно максимумов активности вулканов типа Р составляет в среднем 6-7 лет.

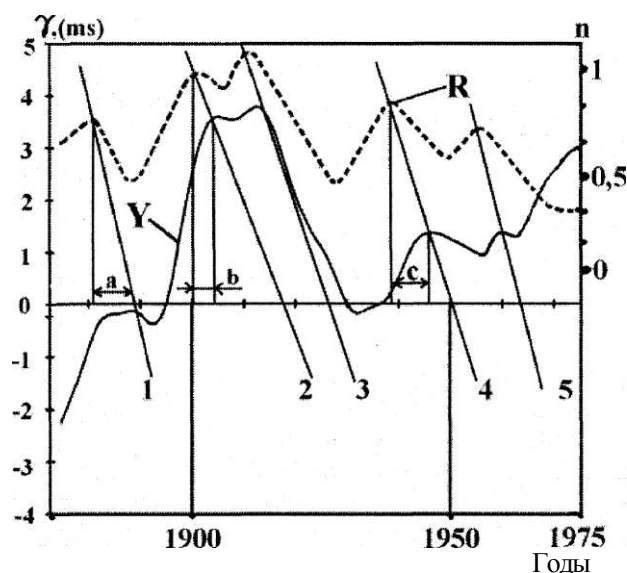


Рис. 30. Фрагмент сопоставления графиков вариаций длительности земных суток и активности магматических вулканов типа Р

R- график активности вулканов типа Р; Y- график вариаций длительности земных суток; ось n - число извержений вулканов типа Р; ось $\gamma, (ms)$ - изменения длительности суток в ms; 1,2...п - прямые, соединяющие максимумы циклов активности магматических вулканов типа Р и циклов вариаций длительности суток; а, б, с - отрезки времени, показывающие разницу во времени между максимумами циклов активности вулканов типа Р и вариаций длительности суток

Запаздывание циклов графика вариаций длительности суток по отношению к циклам графика активности вулканов типа Р можно объяснить инертностью событий, т.е. временем, проходящим от момента повышения активизации вулканов до действительного изменения радиуса Земли, влияющего на момент инерции планеты и, как следствие, на длительность земных суток.

Визуальный и графический анализ сопоставления графиков активности вулканов типа Р и вариаций длительности суток показал их высокое сходство, при учете смещения во времени одного из них относительно другого. Между тем, оценка корреляции между собой рассматриваемых графиков не позволила выявить удовлетворительной взаимосвязи и показала коэффициент корреляции $k=0,34$.

Следовательно, простое корреляционное сопоставление временных рядов, отражающих два различных физических процесса, может не показать высокую корреляцию из-за смещения во времени этих процессов. В этом случае предлагается сначала произвести спектральный анализ и убедиться в наличии идентичных гармоник в обоих процессах.

На следующем этапе могут быть применены линейные методы обработки временных рядов, например, метод скользящей средней, позволяющие выявить цикличность и исследовать этот процесс в реальном масштабе времени. В этом случае устанавливаются годы (месяцы) максимальных и минимальных значений циклов активности в обоих процессах и оценивается среднее значение разницы во времени между максимумами (минимумами) в циклах обоих процессов, вычисляется среднее значение для всех циклов, которое принимается за время запаздывания одного процесса относительно другого, с учетом особенностей причинно-следственной связи. После этого, для осуществления корреляционного анализа, временные ряды, путем указанного временного смещения, условно приводятся к единой оси времени. Это осуществляется посредством совмещения экстремальных значений (максимумов или минимумов) одного процесса (причины) с другим (следствием), после чего производится вычисление коэффициента корреляции между ними, как это показано на рис. 31.

Как видно из рис. 31, максимумы циклов активности вулканов типа Р совмещены по времени с максимумами циклов вариаций длительности суток. Вычисление коэффициента корреляции, произведенное после этой процедуры, позволило получить высокую корреляцию с $k = 0,76$.

В этом случае удастся установить реальную степень взаимосвязи процессов, за вычетом временной разницы между рассматриваемой причиной и ее следствием. В рассмотренном примере между моментом повышения активности вулканов типа Р и временем увеличения длительности суток (повышением угловой скорости вращения Земли) существуют промежуточные процессы. В данном случае промежуточным процессом является увеличение радиуса Земли, приводящее к изменению момента инерции Земли и, как следствие, замедлению ее вращения.

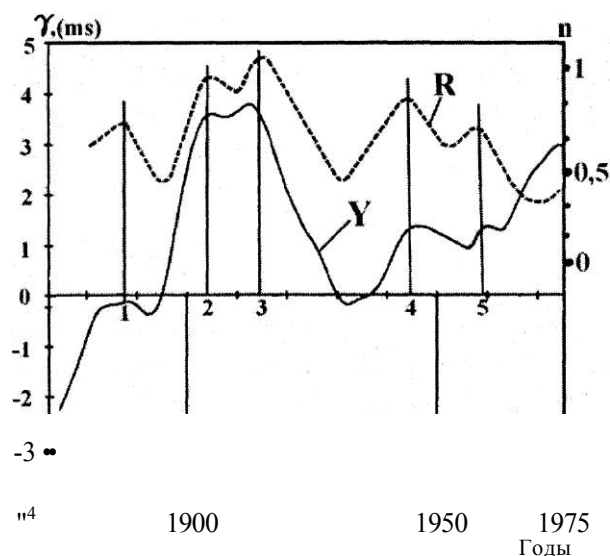


Рис. 31. Фрагмент сопоставления графиков вариаций длительности земных суток и активности магматических вулканов типа Р (после приведения максимумов циклов на обоих графиках к единым моментам времени)

Р - график активности вулканов типа Р; Y - график вариаций длительности земных суток; ось п - число извержений вулканов типа Р; ось y, (ms) - изменения длительности суток в ms; 1, 2, ..., п - прямые, соединяющие максимумы циклов активности магматических вулканов типа Р и циклов вариаций длительности суток

24.3. Принципиальные особенности физических различий волновых и циклических процессов

В принципе выявление скрытых периодичностей в определенной степени решает задачу анализа волновых процессов во временных рядах. Между тем, в этом вопросе имеется особенность, не позволяющая с помощью одних и тех же математических методов объективно оценивать различные процессы периодического характера. Это связано, прежде всего, с фундаментальным отличием физической сути циклических и волновых процессов в природе. Хотя волновые процессы можно, при определенных условиях, рассматривать как циклические, нами будет показана принципиальная разница в физическом механизме волновых и циклических процессов.

Если циклические процессы обычно отражают повышение и понижение определенных параметров (числа землетрясений, извержений вулканов, солнечных пятен, сейсмической энергии), то волновой процесс, по своей сути, означает смену знака выделяющейся энергии в рассматриваемом процессе с положительного

на отрицательный, и наоборот. В отличие от циклических процессов, волновые процессы несут равную по величине, но противоположную по знаку энергию. Например, электромагнитные, акустические или гравитационные волны.

Таким образом, оба полупериода волны, как положительный, так и отрицательный, несут в себе равную энергию, вызывающую соответствующую реакцию среды на эти процессы. Между тем, в циклических процессах максимум цикла означает максимальное количество приносимой в систему энергии, а минимум циклов - минимальное. В циклических процессах мы имеем дело с процессами, обладающими только положительной составляющей. Естественно, что не может быть выделено отрицательное количество сейсмической энергии, так же как не может произойти отрицательное число землетрясений и извержений вулканов. Поэтому, рассматривая и анализируя, порой волновые процессы в качестве циклических исследователи неверно трактуют полученные результаты и упускают из вида физический смысл механизма того или иного процесса.

Если гравитационную волну рассматривать как циклический процесс, то мы будем заведомо считать, что максимум энергии выделяется в максимальных значениях циклов, а минимум, соответственно, в минимальных. Между тем, как известно, гравитационная волна даже физически оказывает на тела противоположные по знаку квадрупольные воздействия. При этом, проходя через тело, она вытягивает его вдоль направления своего распространения и сжимает в перпендикулярном направлении, затем, наоборот, укорачивает его по направлению движения и, расширяет перпендикулярно ему. Следовательно, оба полупериода гравитационной волны несут равную энергию.

Если при анализе циклических процессов нет необходимости построения трендов, позволяющих выделять средние значения процесса, то в волновых процессах построение тренда просто необходимо, чтобы выделить положительные и отрицательные полупериоды волны.

Физический механизм воздействия волновых процессов совершенно иной. Так, если в циклических процессах, говоря о наличии их взаимовлияния, обычно опираются на степень их корреляции (положительной или отрицательной) и при высоком коэффициенте корреляции делают вывод о возможной взаимосвязи этих процессов, то в волновых процессах все обстоит иначе. При волновом процессе наличие корреляции между волновым и циклическим процессами не может быть оценено во всех случаях путем определения коэффициента корреляции, так как при воздействии волнового процесса на циклический в циклическом процессе может наблюдаться удвоение частоты. Это связано с тем, что оба полупериода волны несут равную энергию. Например, если рассматривать воздействие гравитационной волны на сейсмическую активность, то можно говорить об удвоении частоты сейсмической активности, так как изменение формы Земли в противоположных направлениях, вызванное разными полупериодами гравитационной волны, приведет в обоих случаях к повышению напряжений в земной коре и, соответственно, к повышению сейсмической активности.

Нами дается следующая трактовка физической сути волнового и циклического процессов с точки зрения их основных отличительных особенностей.

Волновым является физический процесс, сопровождающийся знакопеременными отклонениями физической величины от условно нулевого (среднего) значения, в котором равные по амплитуде положительные и отрицательные отклонения являются равнозначными по энергии, но противоположными по знаку.

В природе существует масса примеров, когда волновые процессы порождают циклические и, наоборот. Например, собственные колебания Земли, имеющие волновой характер, могут оказывать влияние на изменение слабой (фоновой сейсмичности), вызывая определенную цикличность в ее проявлении. В то же время, цикличность в проявлениях тектонических напряжений (например, вызванная цикличностью скоростей движений литосферных плит) может вызвать образование длиннопериодных тектонических волн (волновой процесс).

Циклическим является физический процесс, сопровождаемый периодически сменяющимся повышением и понижением физической величины одного знака относительно нулевого (минимального) значения. В табл. 2 приводятся примеры природных процессов волнового и циклического характеров.

Таблица 2

Примеры природных процессов волнового и циклического характеров

Наименование природных циклических процессов	Наименование природных волновых процессов
Солнечная активность	Электромагнитные, сейсмические, акустические излучения
Колебания уровней морей и океанов	Квадрупольное знакопеременное изменение метрических параметров тел в поле проходящей гравитационной волны
Сейсмическая активность	Лунно-солнечные приливы и отливы
Вулканическая активность	Знакопеременные вертикальные тектонические движения
Периодичность в проявлении цунами	Периодические изменения радиуса Земли
Вариации выпадения метеосадков	Вариации длительности земных суток
Процесс седиментации	Знакопеременные вариации напряженного состояния земной коры (сжатие-растяжение)

24.4. Пространственно-временные закономерности современной вулканической активности

Различными исследователями делались неоднократные попытки выявления периодичности как грязевых (Г.П. Тамразян, В.А. Горин; Я.А. Гаджиев; Р.Р. Рахманов и др.), так и магматических (В.И. Влодавец; И.И. Гущенко; А. Chance, Kelly, М. Рампина; С.В. Цирель и др.) вулканов. При этом рассматри-

вались либо вулканы отдельных регионов Земли, либо все магматические вулканы без учета их классификаций по геодинамическим типам (Земцов, Тронь, 1985). Оба подхода, по нашему мнению, не позволили выявить объективность существующей закономерности в пространственно-временном распределении извержений вулканов, так как в первом случае деятельность вулканов отражает лишь локальные периоды тектонической активности отдельных регионов, а во втором случае проявления активности различных типов вулканов накладываются друг на друга, тем самым искажая истину.

Кроме того, согласно существующим представлениям, магматические и грязевые вулканы не связаны между собой генезисом и отражают различные геологические процессы, причем грязевой вулканизм связывается с локальными процессами, присущими конкретным регионам.

В предыдущих разделах нами было показано, что грязевые вулканы пространственно связаны с планетарными поясами сжатия Земли. Представляет большой интерес изучение изменений грязе-вулканической активности во времени.

Как указывалось выше, магматические вулканы делятся на четыре геодинамических типа: поясов сжатия Земли (тип С), океанских рифтовых зон (тип ОР), континентальных рифтовых зон (тип КР), океанский внутриплитный (тип ОВ).

Вулканы разных геодинамических типов отличаются не только пространственным расположением, но и продуктами извержений. Так, если вулканизм поясов сжатия Земли является преимущественно андезитовым, то вулканизм поясов растяжения - базальтовым.

Вулканизм океанских рифтовых зон - это преимущественно толеитовый эффузивный вулканизм (например, Исландия, Азорские острова), тогда как вулканизм поясов сжатия Земли - это смешанный эксплозивно-эффузивный от основного до кислого, но преимущественно среднего состава (например, вулканы западного края Американского и восточного края Азиатского материков, а также прилегающих островных дуг, вулканизм Средиземного моря и т.д.).

Океанский внутриплитный вулканизм преимущественно эффузивный толеитовый до щелочно-базальтового (например, вулканы Гавайских островов, островов Зеленого мыса, Канарских островов).

Континентальный рифтовый вулканизм является смешанным эксплозивно-эффузивным, щелочно-базальтовым с высоким содержанием фонолитовой или трахитовой составляющей (например, вулканы Восточной Африки и Красного моря).

Таким образом, различие в продуктах извержений вулканов разных геодинамических типов еще раз свидетельствует о необходимости раздельного изучения активности каждого геодинамического типа вулканов.

В основу настоящих исследований лег принцип раздельного изучения каждого геодинамического типа вулканов. В таком аспекте проблема рассматривается впервые. Применяя описанную ранее методику, нами были выявлены скрытые периодичности в извержениях различных геодинамических типов вулканов.

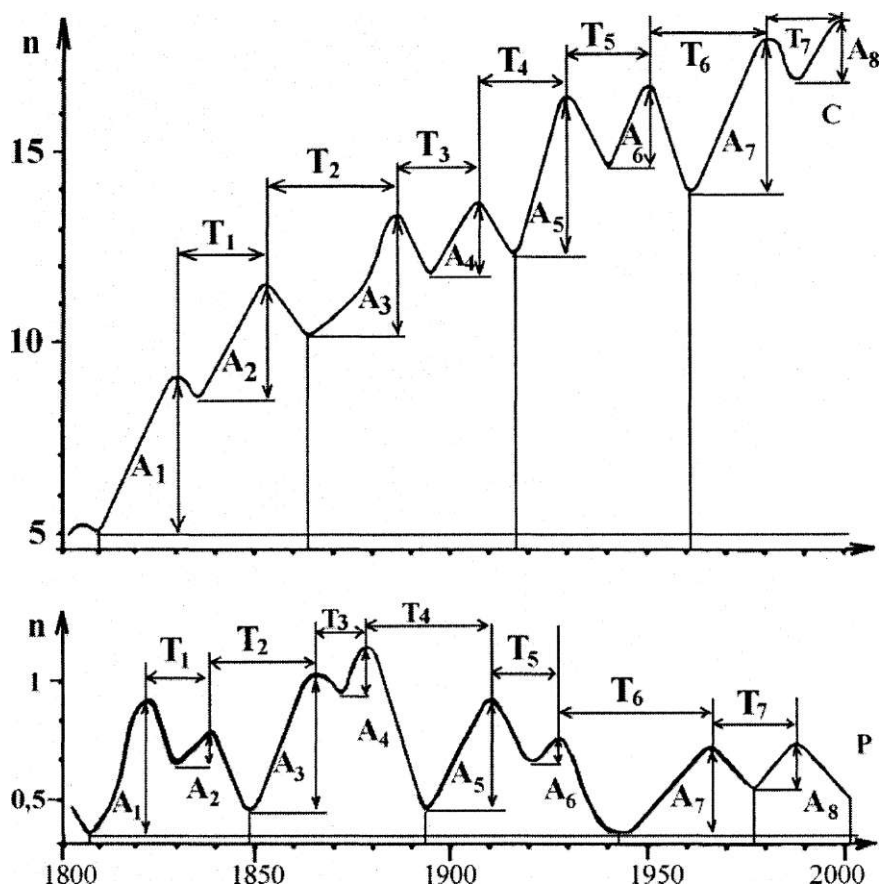


Рис. 32. Графики активности магматических вулканов поясов сжатия Земли С и океанских рифтовых вулканов ОР с 1800 по 2000 годы

$T_1, \dots, T_n$ - периоды времени между максимумами циклов вулканической активности; $A_1, \dots, A_n$ - относительные амплитуды циклов вулканической активности; n - число извержений вулканов

На графике активности вулканов типа С (рис. 32) отчетливо выделились шесть циклов активизации длительностью в среднем 22-25 лет, попарно сгруппированные в три крупные цикла, каждый длительностью в среднем 45-50 лет. Каждый последующий двоекный цикл по абсолютной амплитуде выше предыдущего.

Ниже приводится график активности магматических вулканов типа С за период времени с 1800 по 2000 гг., построенный путем последовательного сглаживания временного ряда извержений вулканов 9- и 11-летними скользящими средними.

Как видно из рис. 32, закономерность в активности извержений вулканов типа С полностью сохраняется и для всего рассматриваемого периода.

Для повышения достоверности выявленных циклов активизации нами была рассчитана периодограмма для извержений вулканов типа С методом максимальной энтропии на основе алгоритма Бурга.

На рис. 33 показана периодограмма извержений вулканов типа С за период с 1800 по 2000 годы.

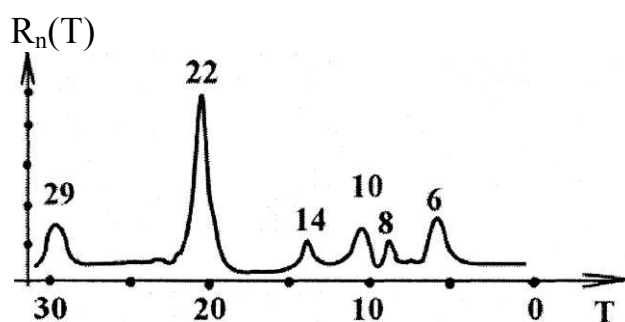


Рис. 33. Периодограмма извержений вулканов типа С за период с 1800 по 2000 годы
 T - период, годы

Как видно из периодограммы, наиболее ярко выражена гармоника с периодом 22 года, представляющая собой усредненный период циклов вулканической активизации, выявленных на рис. 33. В то же время, наличие менее выраженной гармоника в 29 лет также указывает на то, что установленные периоды циклов варьируют в определенных пределах.

Так, на рис. 34 приведен график зависимости периодов времени циклов активизации вулканов типа С от относительных амплитуд следующих после них цик-

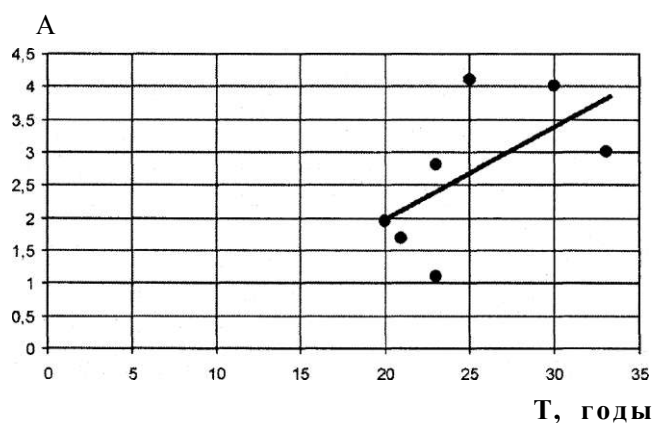


Рис. 34. График зависимости периода между максимумами циклов вулканической активности T от относительной амплитуды последующего цикла активизации A для вулканов типа С

лов активизации. Как видно из графика, чем длительнее период вулканического затишья, тем выше амплитуда последующей вулканической активности.

В табл. 3. приведены значения периодов между максимумами циклов вулканической активности (вулканического затишья) T и относительной амплитуды последующих циклов активизации A . Как видно из таблицы, значения как T , так и A попеременно возрастают и убывают.

Таблица 3

Значения периодов T и относительных амплитуд A циклов активности вулканов типа С

Период, T	23	33	21	25	20	23	30
Амплитуда, A	2,8	3,02	1,67	4,11	1,96	1,1	4

Для наглядности иллюстрации вышеуказанной закономерности нами был построен график зависимости периодов вулканического затишья от порядкового номера этих периодов, по возрастающей (рис. 35). Как видно из графика, на нем совершенно однозначно выявилась цикличность, отражающая попеременное возрастание и убывание периодов вулканического затишья.

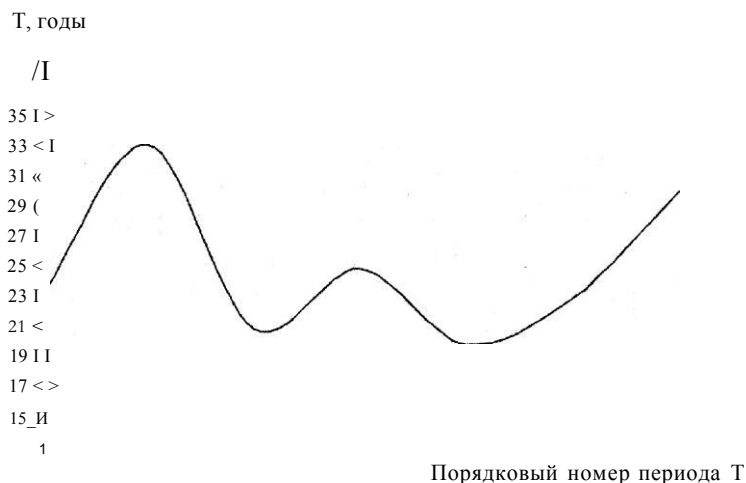


Рис. 35. График зависимости периода вулканического затишья T от порядкового номера периода

Аналогично вышеописанному графику, был составлен график зависимости относительных амплитуд циклов вулканической активности от порядкового номера относительных амплитуд по возрастающей (рис. 36). Как видно из графика, на нем также четко отображается циклический характер периодического увеличения и уменьшения значения относительных амплитуд циклов вулканической активности.

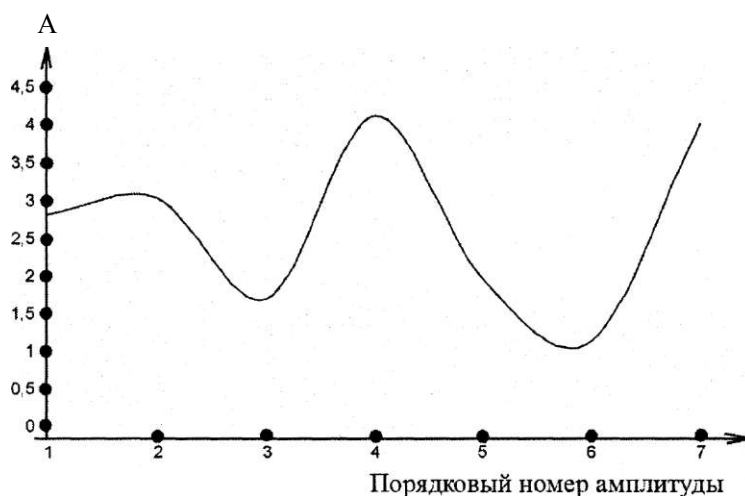


Рис. 36. График зависимости относительных амплитуд циклов вулканической активности от порядкового номера амплитуд

Таким образом, приведенные результаты исследований подтверждают основное положение научного открытия (Диплом № 239) о том, что степень активизации вулканов поясов сжатия Земли, так же как и промежутки времени между максимумами вулканической активности, попеременно возрастают и убывают, при этом амплитуда циклов вулканической активности прямо пропорциональна периоду вулканического затишья, предшествующему данному циклу (рис. 37).

В активизации вулканов типа Гр (рис. 38) также отчетливо выделились три крупных цикла длительностью в среднем 44—45 лет, каждый из которых состоит из двух малых циклов продолжительностью в среднем 22 года, разделенных относительно неглубокими минимумами. Причем, так же как и на графике активности вулканов типа С, здесь каждый последующий сдвоенный цикл по абсолютной амплитуде выше предыдущего.

Рассмотрим теперь график активности вулканов типа ОР (см. рис. 32). На графике также выделились три крупных цикла продолжительностью в среднем в 48 лет, содержащие два малых цикла, каждый продолжительностью в среднем в 24 года. В отличие от вулканов типов С и Гр, здесь II цикл (сдвоенный) выше I и III (сдвоенных) по абсолютной амплитуде, тогда как последние имеют примерно одинаковую абсолютную амплитуду.

Для более детального анализа рассмотрим соотношение периодов амплитуд. Из табл. 4 видно, что значения относительных амплитуд (A_n , A_n' , A_n''), характеризующих степень активизации вулканов (типов С, Гр, ОР) в каждом цикле, так же как и промежутки времени между максимумами циклов (T_n , T_n' , T_n''), попеременно возрастают и убывают.

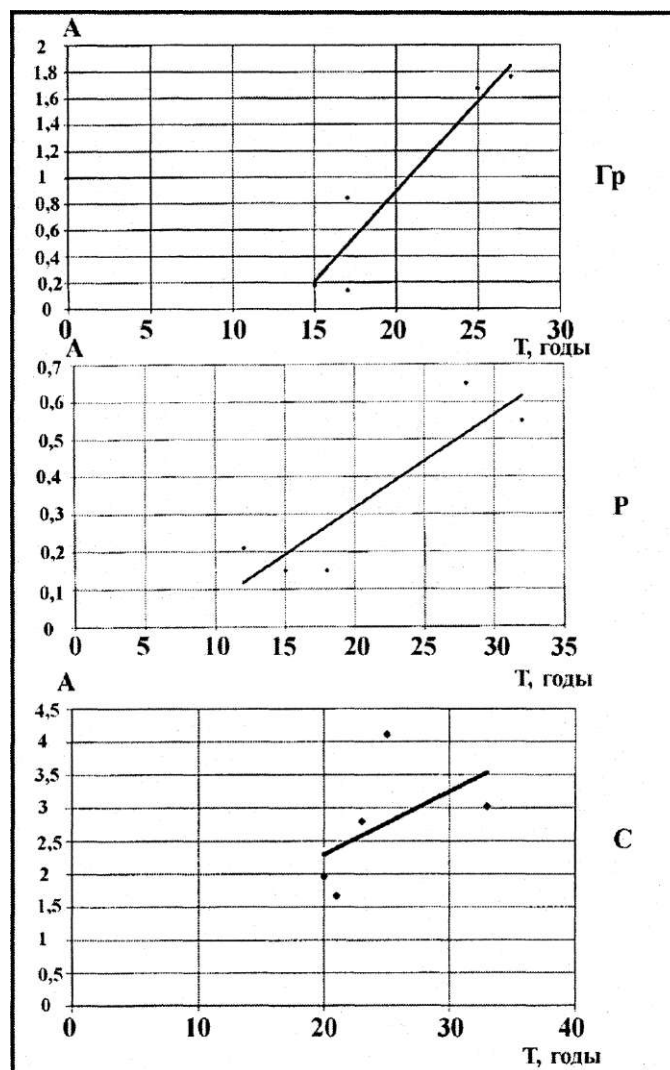


Рис. 37. График зависимости периода между максимумами циклов вулканической активности T и относительной амплитудой последующего цикла активизации A для вулканов типов Гр, Р и С

Активность вулканов типов ОВ и КР имеет идентичный характер, причем оба геодинамических типа вулканов имеют четыре цикла активизации за период времени с 1800 до 2000 гг. Примечательно также, что I и IV циклы активизации вулканов обоих типов совпадают во времени (рис. 39).

Выявление описанной выше периодичности извержений вулканов производилось посредством линейного преобразования исходного ряда.

Таблица 4

Значения периодов T и относительных амплитуд A циклов активности вулканов различных типов

Вулканы типа С		Вулканы типа Гр		Вулканы типа ОР	
T (годы)	A	T (годы)	A	T (годы)	A
23	2,8	17	0,82	15	0,67
33	3,02	25	0,14	28	0,15
21	1,67	17	1,67	12	0,65
25	4,11	27	0,84	32	0,21
20	1,96	15	1,76	18	0,55
23	1,1	-	0,18	-	0,15

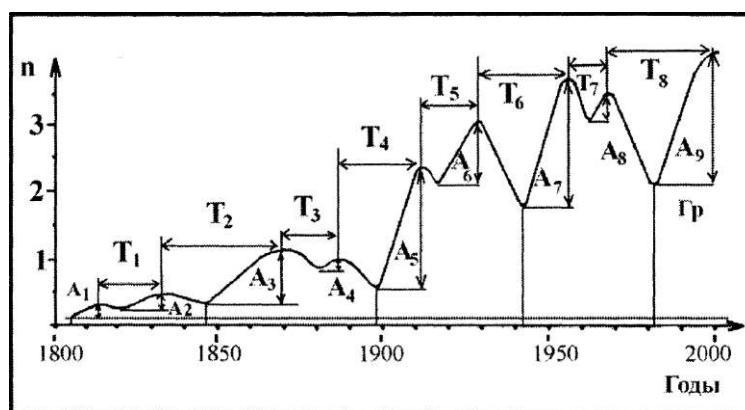


Рис. 38. График активности вулканов типа Гр

T_1 - T_8 - периоды между циклами активизации вулканов; A_1 - A_9 - относительные амплитуды циклов активизации

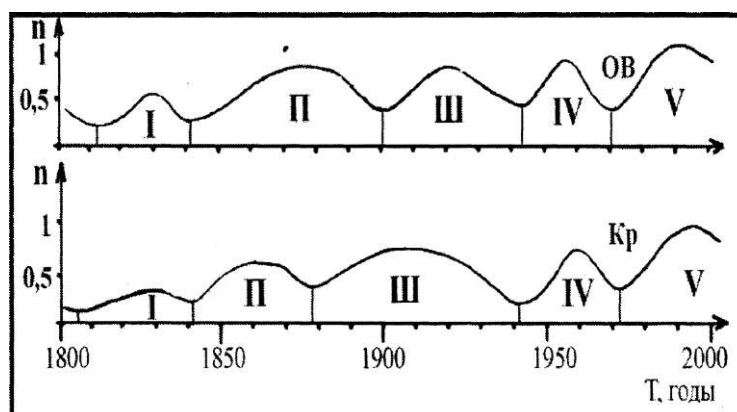


Рис. 39. Графики активности вулканов типа ОВ и КР

Для проверки достоверности выявленных закономерностей в извержениях вулканов нами был произведен расчет спектральной плотности методом максимальной энтропии для активности каждого геодинамического типа вулканов. Для этой цели на основе алгоритма Бурга была составлена компьютерная программа, по которой были рассчитаны спектральные плотности извержений вулканов.

Большую важность при оценке функции спектральной плотности с использованием максимальной энтропии имеет выбор оптимального числа рекурсий (длины фильтра). Считается, что при реализации алгоритма Бурга оптимальным является число рекурсий, составляющее примерно 20-50% от числа членов анализируемого ряда.

Методика расчета спектральной плотности была описана ранее и заключалась в следующем. По составленной программе рассчитывались спектры извержений каждого геодинамического типа вулканов в отдельности. При этом наиболее сложной задачей явился выбор оптимального числа рекурсий (длины фильтра) для каждого типа вулканов. С этой целью начальная длина фильтра была взята постоянной и равной 15, а конечная длина менялась от 50 до 95, с шагом изменения длины фильтра, равным 5.

Таким образом, для каждого геодинамического типа вулканов было рассчитано 10 вариантов спектра при разных значениях длины фильтра. Полученные спектры тщательно анализировались и выбирались те варианты длины фильтра, при которых спектр носил устойчивый характер, а основные его элементы сохранялись и при других вариантах длины фильтра. Так достигалась максимальная объективность при расчетах спектров извержений каждого геодинамического типа вулканов.

Полученные периодограммы с целью фильтрации незначительных флюктуаций сглаживались 7-летними скользящими средними.

На рис. 40 приведены спектры вулканов типов С и Р.

Тип Р является обобщенным для океанских и континентальных рифтовых вулканов и отражает геодинамические процессы в поясах растяжения Земли в целом. Как видно из рис. 40, на всех спектрах отчетливо выделились две гармоники с периодами 46-52 года и 21-22 года.

В то же время, при сравнении периодограмм вулканов типов С и ОР и ГР была выявлена высокая корреляция (рис. 41).

Условно назовем гармонику с периодом 46-52 года гармоникой первого порядка, а гармонику 21-22 года - второго порядка. Эти гармоники нами были выделены при линейном преобразовании исходного ряда.

Сравнение всех спектров не оставляет сомнений в идентичности характера цикличности извержений вулканов типов С и Р.

Были также рассчитаны и построены спектры извержений вулканов типов ОВ и КР. На рис. 42 в извержениях вулканов типов ОВ и КР выделены гармоники с периодами соответственно 42 и 52 года.

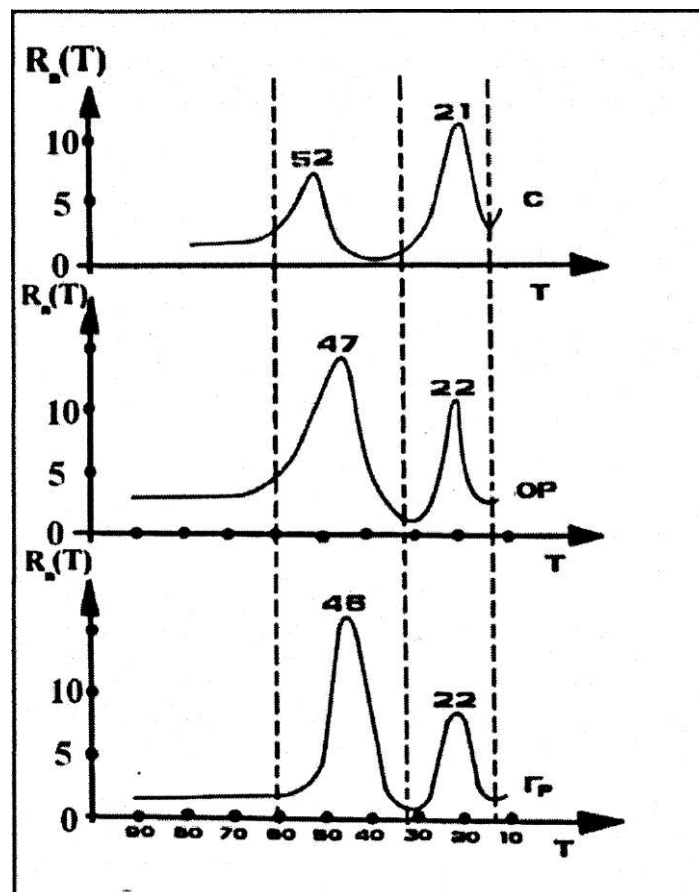


Рис. 41. Периодограммы извержений вулканов типов С, ОР и Гр с 1800 по 2000 гг.

расчет спектральной плотности извержений вулканов каждого геодинамического типа в отдельности производился по специальной методике. Методика заключалась в том, что периодограммы рассчитывались при всех объективно возможных вариантах длины фильтра, что позволяло исключить необъективность либо случайность результата при расчете спектральных плотностей и выявлении скрытых периодичностей. На рис. 40 показаны периодограммы извержений вулканов типов «С» и «Р» с 1800 по 2000 годы, рассчитанные при различной длине фильтра. Приведенные периодограммы не сглаживались, а тренд при расчетах не удалялся. Как видно из рисунка, для вулканов всех типов при изменении длины фильтра (ДФ) от 60 до 80 с шагом 5 происходит уменьшение ширины спектров и увеличение их амплитуды, т.е. периодограмма становится более четкой, причем значение гармоники 22 года не меняется при разной длине фильтра вплоть до ДФ-75, а

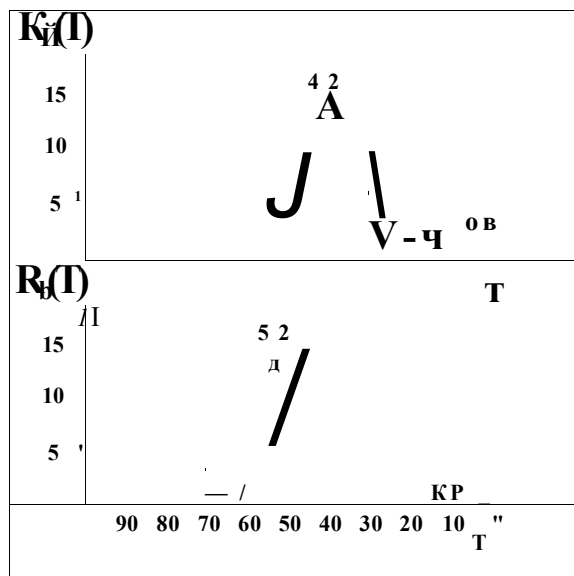


Рис. 42. Периодограммы извержений вулканов типов ОВ и КР с 1800 по 2000 гг.

значение гармоники 44 года при ДФ-70 и ДФ-75 становится равным 46-48 годам, тогда как при ДФ-80 принимает значение 46-52 года.

Для извержений вулканов типа С при ДФ-65 четко выявляется гармоника в 20 лет, затем при ДФ-70 появляется гармоника 48 лет с незначительной амплитудой, а первая смещается на 1 год (21 год), при дальнейшем увеличении длины фильтра происходят смещения значений второй гармоники (48 лет) в большую или меньшую сторону - от 48 до 57 лет. Гармоника с периодом 21 год при изменении длины фильтра от 70 до 100 остается постоянной, меняется только форма спектра - увеличивается его амплитуда и уменьшается ширина. Наиболее четкие формы принимает периодограмма при ДФ-90, при этом четко выявляются две гармоники - 21 год и 52 года.

Для извержений вулканов типа Р при всех значениях длины фильтра совершенно отчетливо выявляются две гармоники - 21-22 года и 45-46 лет, причем по мере увеличения длины фильтра от 65 до 85 ширина спектров уменьшается, а амплитуда увеличивается. Наиболее четкая картина наблюдается при ДФ-75 и ДФ-80.

Как видно из приведенных данных, используемая в настоящей работе методика анализа периодограмм позволяет с максимально возможной объективностью выявлять скрытую периодичность в извержениях всех геодинамических типов вулканов.

При расчетах спектров тренды не удалялись в связи с тем, что, как справедливо отмечено в работе В.М. Киселева (1980), возможна неоднозначность резуль-

тата при удалении линейного тренда, так как не всегда ясно, что в действительности удаляется.

Кроме того, как показали проведенные нами расчеты, удаление прямолинейного тренда не оказывает существенного влияния на полученные результаты - меняется лишь амплитуда спектров и на 1-2 года смещаются периоды гармоник (рис. 43). Вместе с тем, как известно, метод ММЭ является наиболее эффективным, когда периоды выделяемых гармоник значительно меньше длины ряда, в этом случае снятие тренда не оказывает существенного влияния на полученные результаты, что имеет место и в наших исследованиях.

С целью проверки того, насколько установленная общепланетарная цикличность в извержениях различных геодинамических типов вулканов сохраняется и в отдельных регионах, нами были проведены следующие исследования.

Извержения вулканов типа С исследовались с 1800 по 2000 годы самостоятельно по каждому из регионов.

На рис. 44 показаны периодограммы извержений вулканов типа С по каждому из вышеперечисленных регионов, рассчитанные по вышеописанной методике ММЭ. На всех периодограммах отчетливо выделялись две гармоники - первого порядка с периодом 39-55 лет и второго порядка с периодом 21-28 лет (табл. 5). Наибольшую схожесть по величине периодов гармоник первого и второго порядка проявляют периодограммы извержений вулканов регионов №№ 2, 3 и 6, а также регионов №№ 1, 4, 5, 7, 8, 9. В вулканических регионах № 3 и № 8, помимо

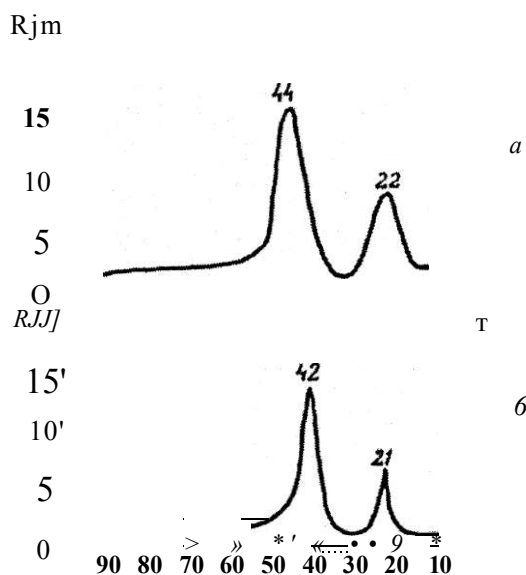


Рис. 43. Периодограммы извержений вулканов типа Гр
а - до удаления прямолинейного тренда; б - после удаления прямолинейного тренда

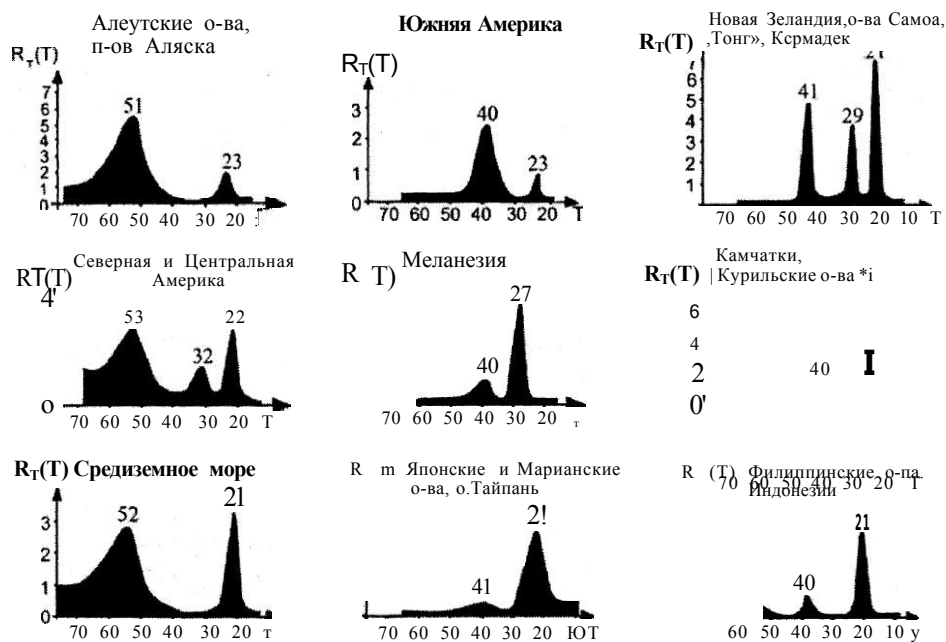


Рис. 44. Периодограммы извержений вулканов типа С для различных вулканических регионов

Таблица 5
Значения периодов гармоник в извержениях вулканов типа С для различных регионов Мира

Наименование вулканического региона	Величина периодов гармоник (годы)		
	1-го порядка	2-го порядка	Прочие
Южная Америка	39	23	-
Алеутские острова, полуостров Аляска	53	23	-
Северная Америка, Центральная Америка	54	22	32
Японские и Марианские острова, о. Тайвань	41	23	-
Филиппинские острова, Индонезия	39	21	-
Средиземное море	55	21	-
Камчатка, Курильские острова	40	25	-
Острова Самоа, Тонга, Кермадек, Новая Зеландия	41	21	29
Меланезия	40	28	-
В среднем	45	23	30,5

двух основных гармоник, менее интенсивно проявляются гармоники 32 года и 29 лет, которые не выявляются в извержениях вулканов других регионов и, по нашему мнению, являются случайными.

Как видно из табл. 5 и рис. 44, из девяти рассмотренных регионов в 7 регионах гармоники II порядка имеют период 21-23 года, в одном регионе №7 (Камчатка, Курильские острова) - 25 лет и в регионе №9 (Меланезия) - 28 лет.

Таким образом, как видно из результатов проведенных исследований, в извержениях вулканов типа С всех вулканических регионов выявлены две гармоники - первого порядка с периодом в среднем 44-45 лет и второго порядка с периодом в среднем 22-23 года, что подтверждает сделанный вывод о наличии подобной цикличности в целом для извержений вулканов геодинамического типа С.

Проведение объективных и статистически корректных исследований вулканической активности по отдельным регионам других типов вулканов не представляется правомерным в связи со сравнительной малочисленностью вулканов типов ОР, ОВ, КР, Гр.

С целью проверки достоверности и объективности установленных закономерностей извержений вулканов для различных интервалов времени, нами были дополнительно проведены следующие исследования. Для вулканов типа С был проанализирован временной ряд извержений с 1500 по 1800 годы путем линейного преобразования исходного ряда методом скользящей средней (МСС).

Сглаживание реальных чисел извержений вулканов производилось при различных интервалах сглаживания, причем было использовано десять вариантов сглаживания: 3; 3-3; 3-5; 5-6; 5-7-9; 3-5-7; 9-9; 7-9-11 (где значение числа в каждом варианте сглаживания есть величина интервала усреднения).

После каждого варианта сглаживания полученные результаты анализировались, причем для каждого геодинамического типа вулканов определялся коэффициент корреляции между последующим и предыдущим вариантом, тем самым оценивалась степень эффективности подавления высокочастотных составляющих и степень изменения характера результатов в зависимости от величин интервалов сглаживания и их числа.

Коэффициенты корреляции между результатами сглаживания в вариантах: 5-7-9; 9-9; 9-11 находятся в пределах 0,98-0,99. Это свидетельствует о том, что дальнейшая фильтрация не приведет к изменениям в полученных результатах.

На рис. 45 показан график активности вулканов типа С с 1500 по 1800 годы, построенный по дважды скользящим девятилеткам. Как видно из графика, отчетливо выявляются циклы с периодами 22-27 лет, попарно сгруппированные в более крупные циклы с периодом 45-55 лет, причем время между максимумами циклов вулканической активности, также как и степень активизации вулканов A_n возрастают и убывают (табл. 6).

Для наглядности в табл. 6 приведены значения соотношений относительных амплитуд и промежутков времени между максимумами вулканической активности, вычисленные по формулам:

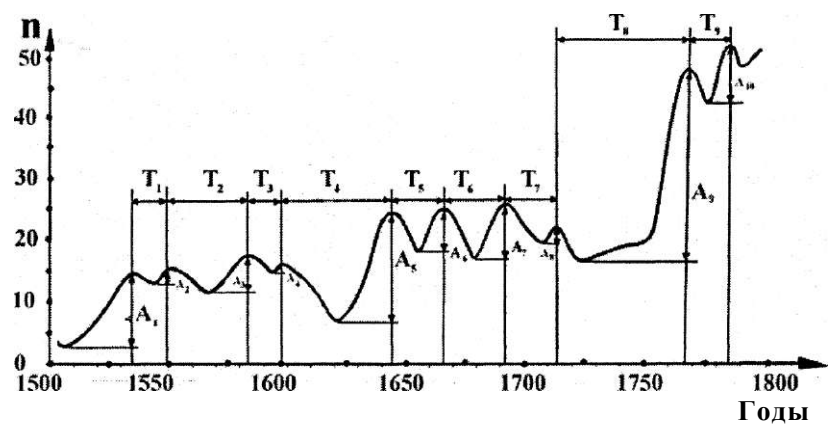


Рис. 45. График активности вулканов типа С с 1500 по 1800 годы

Значения степени активизации (амплитуды циклов активизации A_n) и периодов времени между максимумами циклов вулканической активности T_n с 1500 по 1800 годы

A_n	T_n (годы)
1,15	14
0,3	35
0,46	14
0,07	46
1,60	22
0,60	26
1,65	22
0.08	54
3,9	16
0,92	

$$\frac{A_{n-1}}{A_n} = \frac{T_{n-1}}{T_n} \tag{2.5},$$

где T_n - промежуток времени между максимумами вулканической активности; A_n - относительные амплитуды циклов активизации.

В табл. 7 представлены значения соотношений относительных амплитуд и промежутков времени между максимумами вулканической активности типа С.

На рис. 46 приведено графическое изображение данных табл. 7. Как видно из графика, попеременное чередование положительных и отрицательных значений вычисленных соотношений свидетельствует о том, что характер цикличности из-

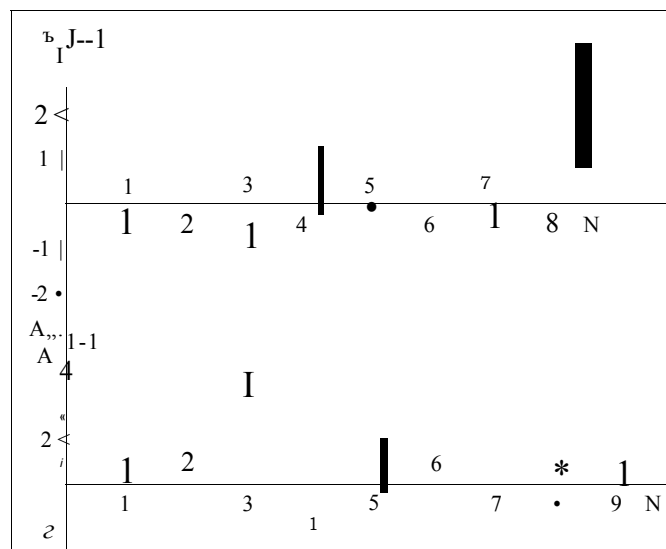


Рис. 46. Графическое изображение данных таблицы 7

Таблица 7

Значения соотношений относительных амплитуд и промежутков времени между максимумами вулканической активности типа С

Вулканы типа С	
$(A_n/A_k) - 1$	$(T_n/D_n) - 1$
2,83	-0,60
-0,35	1,5
5,57	-0,69
-0,96	1,09
1,67	-0,15
-0,64	0,18
20,6	-0,59
-0,97	2,38
2,36	

вержений вулканов типа С за период с 1500 по 1800 годы полностью совпадает с таковым за период времени с 1800 по 2000 годы. Следовательно, установленный характер цикличности извержений вулканов типа С, описанный ранее за период с 1800 по 2000 годы, сохраняется и в более ранние годы, а в общей сложности - в течение рассмотренных 500 лет (с 1500 по 2000 годы), что свидетельствует о достоверности сделанных выводов.

Исследование методом скользящей средней временных рядов извержений вулканов других типов (ОР, КР, Гр, ОВ) с 1500 по 2000 годы не будет являться

корректным в связи с их малочисленностью и неполнотой данных по их извержениям в указанный период времени.

При незначительном количестве вулканов указанных типов потеря информации об их извержениях за ранний период (с 1500 по 2000 годы) может составить ощутимую долю от общего числа извержений, что окажет весьма существенное влияние на статистическую достоверность и корректность сделанных выводов.

В то же время количество вулканов типа С велико, расположены они, в основном, в населенных в рассматриваемое историческое время районах, что позволяет утверждать, что потеря информации об их извержениях с 1500 по 1800 годы не столь велика по сравнению с общим числом их извержений и не оказывает существенного влияния при изучении характера их активности как стохастического процесса.

В то же время для оценки справедливости установленных пространственно-временных закономерностей извержений вулканов для любых отрезков времени нами были проведены дополнительные исследования, суть которых заключалась в следующем.

Временные ряды извержений всех типов вулканов были нами разбиты на отрезки времени продолжительностью не менее 100 лет, при этом для вулканов типа С был исследован временной ряд извержений общей продолжительностью с 1500 по 2000 годы, для вулканов типов КР, ОВ, Гр с 1800 по 2000 годы, для вулканов типа ОР с 1700 по 2000 годы.

Рассмотрим периодограммный анализ извержений вулканов типа С за различные интервалы времени. Так, изучаемый период времени с 1500 по 2000 годы был условно разбит на интервалы времени продолжительностью 100 лет (1500-1600, 1600-1700, 1700-1800, 1800-2000 гг.), причем последний изучаемый интервал времени равен 200 годам.

Выбор величины изучаемых интервалов времени (не менее 100 лет) объясняется тем, что метод максимальной энтропии эффективен только при значительной длине ряда, превышающей периоды выделяемых гармоник не менее, чем в 2 раза, причем чем больше длина ряда, тем выше эффективность ММЭ.

В то же время ММЭ эффективно работает только в том случае, если длина фильтра составляет 20-50% от числа членов анализируемого ряда, т.е. при длине ряда 100 лет длина фильтра наиболее эффективна в пределах от 20 до 50, при этом выделяемые нами гармоники также имеют периоды в промежутке от 20 до 50 лет. Меньшая длина временного ряда (менее 100 лет) не позволит выделить в извержениях вулканов гармоники 1-го порядка.

В табл. 8 приведены результаты периодограммного анализа извержений вулканов типов С и Р за различные интервалы времени. Как видно из рис. 47, временной ряд извержений вулканов типа С был разбит на пять интервалов.

В извержениях каждого из пяти интервалов были выделены гармоники первого порядка - 39-53 года (в среднем 48 лет) и второго порядка - 20-27 лет (в среднем 22 года).

Таблица 8

**Результаты периодограммного анализа извержений вулканов типов С и Р
за различные интервалы времени**

Тип вулканов	Интервал времени (годы)	Величина периодов выделенных гармоник (годы)	
		I порядка	II порядка
С	1500-1600	53	22
	1600-1700	45	27
	1700-1800	39	22
	1800-1900	51	20
	1800-2000	52	21
В среднем		48 лет	22 года
Р	1700-1800	46	29
	1800-1900	44	21
	1800-2000	47	22
	1500-1800	46	29

Временной ряд извержений вулканов типа Р был разбит на четыре интервала, причем два изучаемых интервала имеют продолжительность по 100 лет (1700—1800 гг. и 1800-1900 гг.), один временной интервал продолжительностью 200 лет (1800-2000 гг.) и один временной интервал - 300 лет (1500-1800 гг.). В извержениях вулканов типа Р всех изучаемых интервалов времени были выявлены две гармоники - первого порядка с периодом 44-47 лет (в среднем 46 лет) и второго порядка - 21-29 лет (в среднем 25 лет).

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что выявленные в извержениях вулканов типов С и Р гармоники первого и второго порядков справедливы для различных интервалов времени, что подтверждает достоверность ранее сделанных выводов.

Проведенные нами дополнительные исследования позволили прийти к следующим основным выводам:

1. Установленная закономерность пространственно-временного распределения извержений вулканов справедлива и для отдельных вулканических регионов в зависимости от их приуроченности к тому или иному геодинамическому типу.

2. Установленная закономерность в извержениях вулканов сохраняется независимо от выбора исследуемого интервала времени.

Установленную закономерность в пространственно-временном распределении извержений вулканов можно объяснить следующим образом.

В период активизации океанского рифтогенеза повышается активность вулканов типа ОР, при этом по обе стороны от рифтовых зон океанская литосфера подвергается сильному сжатию. Волна сжатия перемещается от рифтовых зон к противоположным границам плит, после которых повышается тектоническая активность поясов сжатия Земли. Это, в свою очередь, приводит к повышению активности вулканов С и Гр. Однако, если для активизации вулканов типа С не-

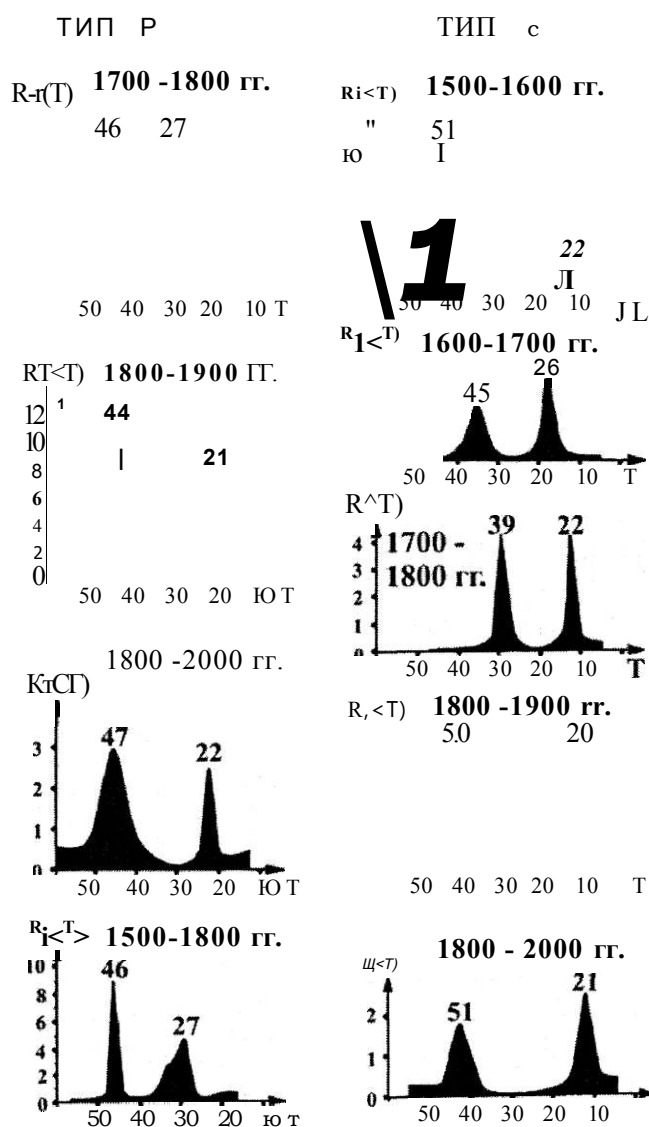


Рис. 47. Периодограммы извержений вулканов типов Р и С за различные интервалы времени

обходимо достаточно длительное воздействие сжатия, чтобы произвести тектонические подвижки в литосфере (которая на континентах имеет огромную мощность) и спровоцировать извержение, то для вулканов типа Гр, связанных непосредственно с зонами АВПД в осадочной толще, сравнительно незначительные тектонические подвижки в верхних слоях литосферы могут вызвать повышение

АВПД и извержения грязевых вулканов. Этим можно объяснить смещение по фазе графиков активности вулканов типов С и Гр.

Континентальный рифтовый вулканизм отражает процесс растяжения континентальной литосферы Земли. Однако, если в океанских поясах рифтогенеза происходит растяжение тонкой литосферы, чутко реагирующей на сравнительно незначительные напряжения, то в континентальных рифтовых зонах осуществляются растяжение и разрыв мощной континентальной литосферы. В связи с этим естественно, что процесс континентального рифтогенеза является более инертным, и литосфера реагирует только на значительные напряжения, что накладывает свой отпечаток на характер цикличности вулканов типа КР, в которой отражаются только крупные циклы активизации.

Что касается вулканов типа ОВ, то об их образовании и деятельности в настоящее время наиболее популярной является гипотеза горячих точек, мантийных плюмов. Эта гипотеза была сформулирована более 40 лет назад Т. Вильсоном (Wilson, 1963) и в настоящее время продолжает разрабатываться.

Выявленная цикличность в деятельности вулканов типа ОВ позволяет сделать вывод о непосредственной связи внутриплитного вулканизма с глобальными геологическими процессами, воздействующими на активизацию вулканов других типов, в частности, на активизацию континентального рифтового вулканизма.

Отсутствие более мелких циклов в активности вулканов типа «ОВ» можно объяснить также инертностью наиболее стабильных участков литосферы - внутренних частей плит, в результате чего происходит как бы естественное сглаживание влияния тектонических процессов на извержения вулканов типа ОВ.

Установленная закономерность пространственно-временного распределения извержений вулканов вносит существенные изменения в существующие представления о вулканической активности Земли и закономерностях глобальных геодинамических процессов.

Открытие данной закономерности позволяет пересмотреть существующие представления о глобальных геодинамических процессах, в частности, о процессах растяжения и сжатия литосферы и их влиянии на изменение угловой скорости вращения Земли, о механизмах накопления и разрядки напряжений в тектонически активных зонах, о связи деятельности грязевых вулканов с глобальными геодинамическими процессами и соотношениях деятельности различных типов вулканов и т.д.

Растяжение и сжатие литосферы, безусловно, оказывают влияние на многие геологические и космические процессы, в частности, на изменение угловой скорости вращения Земли.

Установление настоящей закономерности показало, что грязевой вулканизм связан с глобальными геодинамическими процессами и по характеру периодичности сходен с магматическим вулканизмом поясов сжатия Земли. Этот вывод в корне меняет сложившиеся представления о локальности проявлений грязевых вулканов. Кроме того, установлено, что магматические вулканы океанских риф-

товых зон, поясов сжатия Земли и грязевые вулканы обнаруживают идентичную периодичность извержений. В то же время активность магматических вулканов континентальных рифтовых зон и океанских внутриплитных также имеет идентичный характер, что противоречит сложившимся представлениям, согласно которым океанские и континентальные рифтовые вулканы должны иметь идентичный характер периодичности, так как и те, и другие связаны с процессами рифтогенеза, тогда как деятельность океанских внутриплитных вулканов должна носить сугубо локальный характер.

Установленная закономерность позволила выяснить, что степень активизации вулканов океанских рифтовых зон, поясов сжатия Земли и грязевых вулканов пропорциональна времени вулканического «затишья», т.е. чем больше время между максимумами активизации вулканов, тем выше степень последующей активизации. Этот вывод имеет чрезвычайно важное значение и может быть использован для прогнозирования вулканической активности.

24.5. Пространственно-временные закономерности современной сейсмической активности

Изучением закономерностей проявлений современной сейсмической активности Земли занимались многие исследователи. Х. Беньоф впервые построил кумулятивные кривые высвобождающейся энергии деформации за определенный период времени для неглубоких землетрясений всего земного шара (рис. 48). Он определил, что корень квадратный энергии, выделяемой при землетрясении, пропорционален высвобождающейся при этом деформации.

Б. Гуттенбергом и Ч. Рихтером (Gutenberg, Richter, 1954) получены уравнения, связывающие магнитуды землетрясений с их повторяемостью:

$$X = \quad (2.6)$$

где X - среднее число землетрясений на единицу объема в единицу времени, имеющих магнитуду, превышающую M ; a и p - региональные константы a широко варьирует от точки к точке, а $|3|$ получают при обработке данных землетрясений, и этот параметр зависит от способности горных пород к локальному разрушению.

Из вероятностных моделей сейсмичности наиболее часто применяется модель Пуассона, основанная на предположении, что землетрясения происходят во времени в соответствии с пуассоновским процессом и что все M (магнитуды) независимы и одинаково распределены. Следовательно, вероятность того, что в течение интервала времени $(0, t)$ произойдет N землетрясений с магнитудой, превышающей M , равна

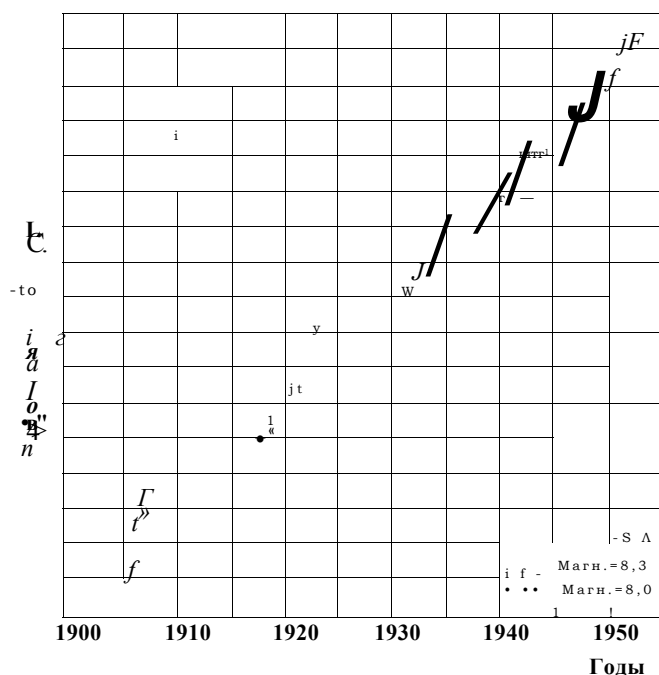


Рис. 48. Высвобожденная деформация при неглубоких землетрясениях (в глобальном масштабе), по Беньофу

$$P_N = (\exp(-v_M t) - (v_M t)^N) / N!, \quad (2.7)$$

где v_M - среднее число превышающей магнитуды M в данном объеме.

Так, Ш. Мей (Mei, 1960) была построена кривая суммарной высвобожденной сейсмической энергии с 466 г. до настоящего времени для региона Кансю и Северного Китая. Это период, для которого информация о крупных землетрясениях является наиболее полной.

Сейсмическая активность в течение первого и последнего отрезков этого периода высока, но в течение 800 лет, в период от 200 г. до 1000 г. н.э., сильные толчки почти полностью отсутствовали. Как отметил О.Д. Гоцадзе (1969), если ограничиться рассмотрением одной сейсмогенной зоны, то для нее должны быть характерны и признаки периодичности «процесса накопления и высвобождения энергии деформации земной коры». В своих работах А.Г. Гамбурцев и др. (2004) попытались выявить определенные циклы в современной сейсмичности Земли. Так, исследуя сейсмическую активность Фенноскандии и Кавказа, они установили наличие ритмов с периодами 2-3 года, 5-6 лет, 10-11 лет, 20 и 30 лет. Примечательно, что ритмы с периодами 10-11 лет и 20 лет подтверждают ранее опубликованные нами исследования по выявлению циклов вулканической и сей-

смической активностей. В то же время наличие выявленных А.Г. Гамбурцевым и др. (2004) ритмов с периодами 2 мес., 5 мес., 8 мес., 1 год, 2-3 года, 5-6 лет, и 8-9 лет, на наш взгляд, несколько сомнительно, и, по всей видимости, связано с особенностями выбора фильтров и других параметров при спектральном анализе временных рядов.

По результатам спектрально-временного анализа Н.В. Кондорская и др. (2002) установили сейсмические режимы для Кавказа и окружающей территории. В частности, ими было обнаружено, что перед сильным землетрясением имеет место уменьшение суммарно выделившейся энергии и периода ее вариаций. Были выделены циклы с периодами: 5-10 лет; 2,5-3 года; 0,9-1,5 года; 8, 5, 4, 2, 3 мес. На наш взгляд, выделение такого большого числа циклов с близкими периодами может быть связано с наличием в полученном результате большой доли шумовой составляющей.

Нами были проведены исследования пространственно-временных особенностей распределения современной сейсмичности Земли, в основу которых положены следующие принципы. Все землетрясения были классифицированы на четыре геодинамических типа, по аналогии с вулканами, в зависимости от их приуроченности к тем или иным планетарным геодинамическим зонам: землетрясения поясов сжатия Земли (С); землетрясения океанские внутриплитные (ОВ); землетрясения океанские рифтовые (ОР); землетрясения континентальные рифтовые (КР).

Каждый из указанных типов землетрясений отличается не только пространственной приуроченностью к различным геодинамическим зонам, но и своим механизмом. Так, в поясах сжатия Земли происходят землетрясения, очаги которых связаны с напряжениями горизонтального сжатия, оси которых направлены перпендикулярно к основным структурным элементам региона (Балакина и др., 1967). В то же время в очагах океанских и континентальных рифтовых землетрясений преобладают напряжения растяжения, оси которых направлены также перпендикулярно к основным структурным элементам земной коры (рифтам). Очаги землетрясений внутриплитных зон связаны с разными типами напряжений, включая сдвиговые, связанные, например, с трансформными разломами.

Проводимые нами исследования условно можно разделить на два этапа. На первом этапе использовались инструментальные данные о землетрясениях с магнитудой < 7 , приведенные в каталоге Мирового центра данных Б2, составленного на основе каталогов Гуттенберга-Рихтера и данных сейсмических служб США и СССР за период времени с 1902 по 1981 годы.

Для более позднего периода времени (до 2000 г.) использовались каталоги МЦД и другие источники, описанные в предыдущих разделах. В процессе исследований была составлена программа выборки координат землетрясений из каталогов по заданным квадратам. Ниже приведены таблицы 9-12, в которых даны значения координат угловых точек заданных квадратов для различных геодинамических типов землетрясений.

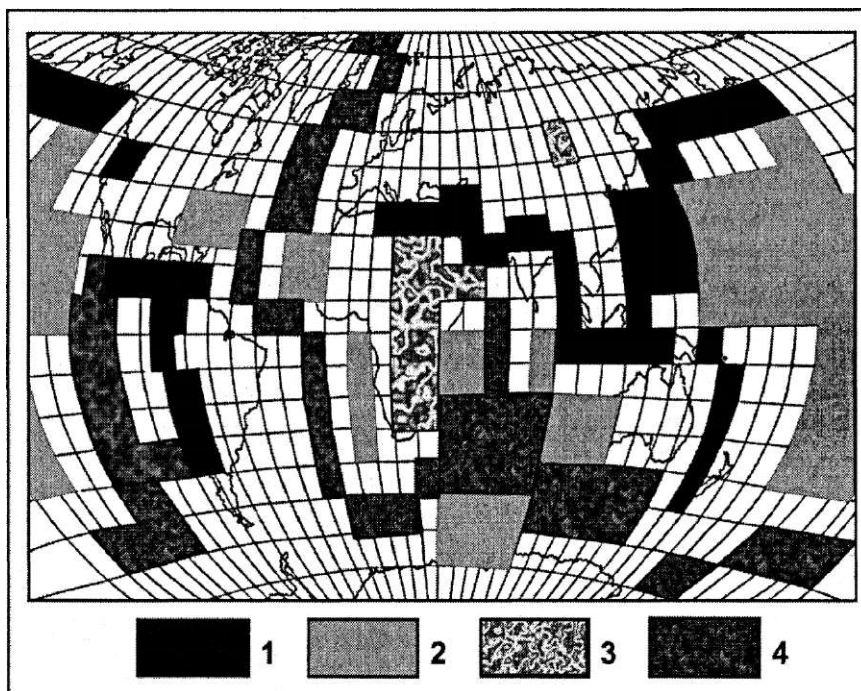


Рис. 49. Карта поясов сейсмической активности Земли

1 - зоны сжатия Земли-тип С; 2-океанские внутриплитные зоны-тип ОВ; 3 -континентальные рифтовые зоны - тип КР; 4 - океанские рифтовые зоны - тип ОР

На рис. 49 показана карта с выделенными нами по границам координатной сетки геодинамическими зонами. Ограничение выделенных геодинамических зон линиями координатной сетки продиктовано необходимостью облегчения компьютерной обработки данных.

Надо отметить, что выборка землетрясений с $M < 7$ объясняется тем, что, как показал анализ каталога землетрясений Мира, подавляющее большинство землетрясений с $M > 7$ (более 90%) происходит в поясах сжатия Земли, на остальные же геодинамические пояса приходится большое число землетрясений с $M < 7$. Таким образом, чтобы произвести статистический анализ землетрясений типов ОР, КР и ОВ, необходимо было использовать данные землетрясений с $M < 7$.

По описанной ранее методике, методом максимальной энтропии на основе алгоритма Бурга, были рассчитаны периодограммы (спектральные плотности) для каждого геодинамического типа землетрясений за период времени с 1902 по 2000 годы.

Анализ спектральной плотности землетрясений различных геодинамических типов позволил выявить ряд особенностей.

**Значения координат угловых точек квадратов,
по которым производилась выборка землетрясений Мира**

1. Землетрясения типа С

Таблица 9

№№ кв.	Широта/ Долгота	Координаты угловых точек квадрата			
		1	2	3	4
1	широта	60 с.ш.	60 с.ш.	50 с.ш.	50 с.ш.
	долгота	150 в. д.	180	180	150 в.д.
2	широта	60 с.ш.	60 с.ш.	50 с.ш.	50 с.ш.
	долгота	180	140 з.д.	140 з.д.	180
3	широта	50 с.ш.	50 с.ш.	40 с.ш.	40 с.ш.
	долгота	140 в.д.	160 в.д.	160 в. д.	140 в.д.
4	широта	40 с.ш.	40 с.ш.	10 с.ш.	10 с.ш.
	долгота	130 в.д.	150 в.д.	150 в.д.	130 в.д.
5	широта	40 с.ш.	40 с.ш.	0	0
	долгота	120 в.д.	130 в.д.	130 в.д.	120 в.д.
6	широта	0	0	10 ю.ш.	10 ю.ш.
	долгота	90 в.д.	140 в.д.	140 в.д.	90 в.д.
7	широта	30 с.ш.	30 с.ш.	0	0
	долгота	90 в.д.	100 в.д.	100 в.д.	90 в.д.
8	широта	35 с.ш.	35 с.ш.	25 с.ш.	25 с.ш.
	долгота	70 в.д.	90 в.д.	90 в.д.	70 в.д.
9	широта	30 с.ш.	30 с.ш.	20 с.ш.	20 с.ш.
	долгота	50 в.д.	70 в.д.	70 в.д.	50 в.д.
10	широта	45 с.ш.	45 с.ш.	30 с.ш.	30 с.ш.
	долгота	40 в.д.	60 в.д.	60 в. д.	40 в.д.
11	широта	10 ю.ш.	10 ю.ш.	50 ю.ш.	50 ю.ш.
	долгота	160 в.д.	170 в. д.	170 в.д.	160 в.д.
12	широта	0	0	10 ю.ш.	10 ю.ш.
	долгота	150 в.д.	160 в.д.	160 в.д.	150 в.д.
13	широта	50 с.ш.	50 с.ш.	40 с.ш.	40 с.ш.
	долгота	125 з.д.	110 з.д.	110 з.д.	125 з.д.
14	широта	20 с.ш.	20 с.ш.	10 с.ш.	10 с.ш.
	долгота	105 з.д.	60 з.д.	60 з.д.	105 з.д.
15	широта	10 с.ш.	10 с.ш.	0	0
	долгота	85 з.д.	70 з.д.	70 з.д.	85 з.д.
16	широта	0	0	10 ю.ш.	10 ю.ш.
	долгота	85 з.д.	75 з.д.	75 з.д.	85 з.д.
17	широта	10 ю.ш.	10 ю.ш.	40 ю.ш.	40 ю.ш.
	долгота	80 з.д.	65 з.д.	65 з.д.	80 з.д.
18	широта	40 с.ш.	40 с.ш.	30 с.ш.	30 с.ш.
	долгота	10 в.д.	40 в.д.	40 в.д.	10 в. д.

2. Землетрясения типа ОР

Таблица 10

№№ кв.	Широта/ Долгота	Координаты угловых точек квадрата			
		1	2	3	4
1	широта	20 с.ш.	20 с.ш.	10 с.ш.	10 с.ш.
	долгота	115 з.д.	105 з.д.	105 з.д.	115 з.д.
2	широта	10 с.ш.	10 с.ш.	0	0
	долгота	120 з.д.	100 з.д.	100 з.д.	120 з.д.
3	широта	0	0	60 ю.ш.	60 ю.ш.
	долгота	120 з.д.	100 з.д.	100 з.д.	120 з.д.
4	широта	30 ю.ш.	30 ю.ш.	40 ю.ш.	40 ю.ш.
	долгота	100 з.д.	80 з.д.	80 з.д.	100 з.д.
5	широта	50 ю.ш.	50 ю.ш.	60 ю.ш.	60 ю.ш.
	долгота	Юз. д.	0	0	10 з.д.
6	широта	50 ю.ш.	50 ю.ш.	60 ю.ш.	60 ю.ш.
	долгота	0	30 в.д.	30 в.д.	0
7	широта	40 ю.ш.	40 ю.ш.	50 ю.ш.	50 ю.ш.
	долгота	30 в.д.	40 в.д.	40 в.д.	30 в.д.
8	широта	0	0	50 ю.ш.	50 ю.ш.
	долгота	20 з.д.	Ю з.д.	Ю з.д.	20 з.д.
9	широта	10 с.ш.	10 с.ш.	0	0
	долгота	40 з.д.	20 з.д.	20 з.д.	40 з.д.
10	широта	30 с.ш.	30 с.ш.	10 с.ш.	10 с.ш.
	долгота	50 з.д.	40 з.д.	40 з.д.	50 з.д.
11	широта	60 с.ш.	60 с.ш.	30 с.ш.	30 с.ш.
	долгота	40 з.д.	20 з.д.	20 з.д.	40 з.д.
12	широта	70 с.ш.	70 с.ш.	60 с.ш.	60 с.ш.
	долгота	30 з.д.	0	0	30 з.д.
13	широта	80 с.ш.	80 с.ш.	70 с.ш.	70 с.ш.
	долгота	Юз. д.	0	0	10 з.д.
14	широта	80 с.ш.	80 с.ш.	70 с.ш.	70 с.ш.
	долгота	0	10 в.д.	10 в.д.	0
15	широта	90 с.ш.	90 с.ш.	80 с.ш.	80 с.ш.
	долгота	0	40 в.д.	40 в.д.	0
16	широта	20 ю.ш.	20 ю.ш.	50 ю.ш.	50 ю.ш.
	долгота	40 в.д.	90 в.д.	90 в.д.	40 в.д.
17	широта	0	0	20 ю.ш.	20 ю.ш.
	долгота	60 в.д.	70 в.д.	70 в.д.	60 в.д.
18	широта	10 с.ш.	10 с.ш.	0	0
	долгота	60 в.д.	70 в.д.	70 в.д.	60 в.д.
19	широта	40 ю.ш.	40 ю.ш.	60 ю.ш.	60 ю.ш.
	долгота	90 в.д.	150 в.д.	150 в.д.	90 в.д.
20	широта	60 ю.ш.	60 ю.ш.	70 ю.ш.	70 ю.ш.
	долгота	160 в.д.	180	180	160 ю.ш.
21	широта	60 ю.ш.	60 ю.ш.	70 ю.ш.	70 ю.ш.
	долгота	180	150 з.д.	150 з.д.	180
22	широта	50 ю.ш.	50 ю.ш.	60 ю.ш.	60 ю.ш.
	долгота	150 з.д.	100 з.д.	100 з.д.	150 з.д.

3. Землетрясения типа КР

Таблица И

№№ кв.	Широта/ Долгота	Координаты угловых точек квадрата			
		1	2	3	4
1	широта	60 с.ш.	60 с.ш.	50 с.ш.	50 с.ш.
	долгота	100 в.д.	110 в.д.	110 в.д.	100 в.д.
2	широта	20 с.ш.	20 с.ш.	10 с.ш.	10 с.ш.
	долгота	40 в.д.	60 в.д.	60 в.д.	40 в.д.
3	широта	30 с.ш.	30 с.ш.	0	0
	долгота	20 в.д.	40 в.д.	40 в.д.	20 в.д.
4	широта	0	0	30 ю.ш.	30 ю.ш.
	Долгота	20 в.д.	40 в.д.	40 в.д.	20 в.д.

4. Землетрясения типа ОВ

Таблица 12

М » кв.	Широта/ Долгота	Координаты угловых точек квадрата			
		1	2	3	4
1	широта	50 с.ш.	50 с.ш.	0	0
	долгота	160 з.д.	140 з.д.	140 з.д.	160 з.д.
2	широта	0	0	40 ю.ш.	40 ю.ш.
	долгота	160 з.д.	140 з.д.	140 з.д.	160 з.д.
3	широта	30 с.ш.	30 с.ш.	0	0
	долгота	140 з.д.	120 з.д.	120 з.д.	140 з.д.
4	широта	0	0	40 ю.ш.	40 ю.ш.
	долгота	140 з.д.	120 з.д.	120 з.д.	140 з.д.
5	широта	40 с.ш.	40 с.ш.	25 с.ш.	25 с.ш.
	долгота	80 з.д.	50 з.д.	50 з.д.	80 з.д.
6	широта	30 с.ш.	30 с.ш.	10 с.ш.	10 с.ш.
	долгота	30 з.д.	10 з.д.	10 з.д.	30 з.д.
7	широта	0	0	40 ю.ш.	40 ю.ш.
	долгота	0	10 в.д.	10 в.д.	0
	широта	50 ю.ш.	50 ю.ш.	70 ю.ш.	70 ю.ш.
	долгота	40 в.д.	90 в.д.	90 в.д.	40 в.д.
9	широта	0	0	20 ю.ш.	20 ю.ш.
	долгота	40 в.д.	60 в.д.	60 в.д.	40 в.д.
10	широта	0	0	20 ю.ш.	20 ю.ш.
	долгота	80 в.д.	90 в.д.	90 в.д.	80 в.д.
11	широта	20 ю.ш.	20 ю.ш.	40 ю.ш.	40 ю.ш.
	долгота	90 в.д.	120 в.д.	120 в.д.	90 в.д.
12	широта	40 с.ш.	40 с.ш.	0	0
	долгота	180 з.д.	160 з.д.	160 з.д.	180 з.д.
13	широта	40 с.ш.	40 с.ш.	0	0
	долгота	160 в.д.	180	180	160 в.д.

Таким образом, как видно из полученных результатов, гармоника, выявленная в сейсмической активности землетрясений с $M < 7$, соответствует таковой в вулканической активности. При этом необходимо учесть, что из общего количества землетрясений на Земле на долю слабых землетрясений с $M < 7$ приходится более 95%. Между тем, как известно, более 90% сейсмической энергии выделяется при сильных землетрясениях с $M > 7$. Поэтому представляет большой интерес изучение закономерностей проявлений сильных землетрясений.

На основании каталогов землетрясений была произведена выборка землетрясений с $M > 7$ с 1600 по 2000 годы, причем с 1902 по 2000 годы использовались также данные по магнитудам сильных землетрясений.

Был произведен периодограммный анализ числа сильных землетрясений типа С за интервалы времени с 1600 по 1900 годы и с 1600 по 2000 годы.

На рис. 50 показаны периодограммы (спектральные плотности) землетрясений типов С, КР, ОВ и ОР, вычисленные при различной длине фильтра (ДФ = 60; 65; 70).

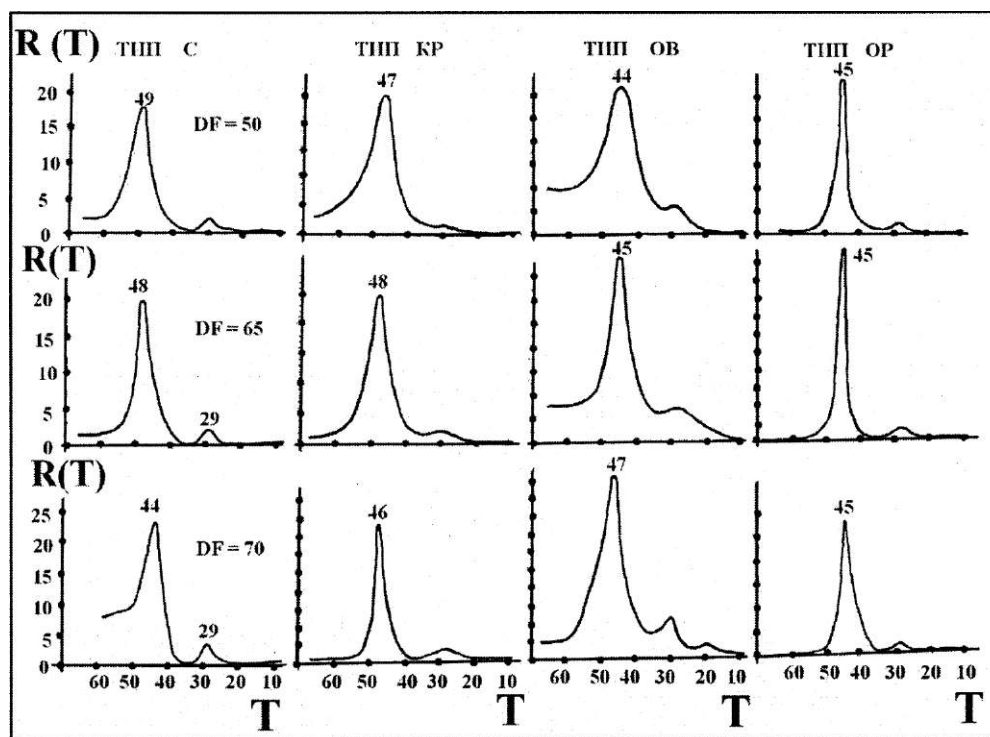


Рис. 50. Периодограммы сейсмической активности для землетрясений типов С, КР, ОВ и ОР с $M < 7$, за период с 1902 по 2000 годы

ДФ = 60-70 длина фильтра, при которой рассчитывались периодограммы

Нетрудно заметить, что на всех без исключения периодограммах ярко выделялась гармоника с периодом в среднем 45^{+17} лет. Между тем на периодограммах землетрясений типов С и ОР менее отчетливо, но достаточно однозначно выделяется гармоника в 29 лет при всех вариантах длины фильтра. В периодограммах землетрясений типов КР и ОВ гармоника в 29-30 лет выявляется менее однозначно и лишь при длине фильтра $ДФ=70$.

На рис. 51 показаны периодограммы числа сильных землетрясений с $M>7$. Высокое сходство периодограмм за оба интервала указывает на устойчивость и достоверность полученных результатов вне зависимости от длины временного ряда выбранного периода времени.

На периодограммах отчетливо выделились три гармоники с периодами 45 лет, 33 года и 22 года, причем гармоника 33 года является более интенсивной, чем 45 лет и 22 года. В то же время были рассчитаны периодограммы числа землетрясений и выделившейся энергии E за период времени с 1902 по 2000 годы. Как видно из периодограмм, отчетливо выделены две гармоники с периодами в среднем 44-45 и 20-22 лет. На наш взгляд, появление гармоники 33 года при изучении числа землетрясений за длительный интервал времени, с 1600 по 2000 годы, является следствием погрешностей самого метода, который, как указыва-

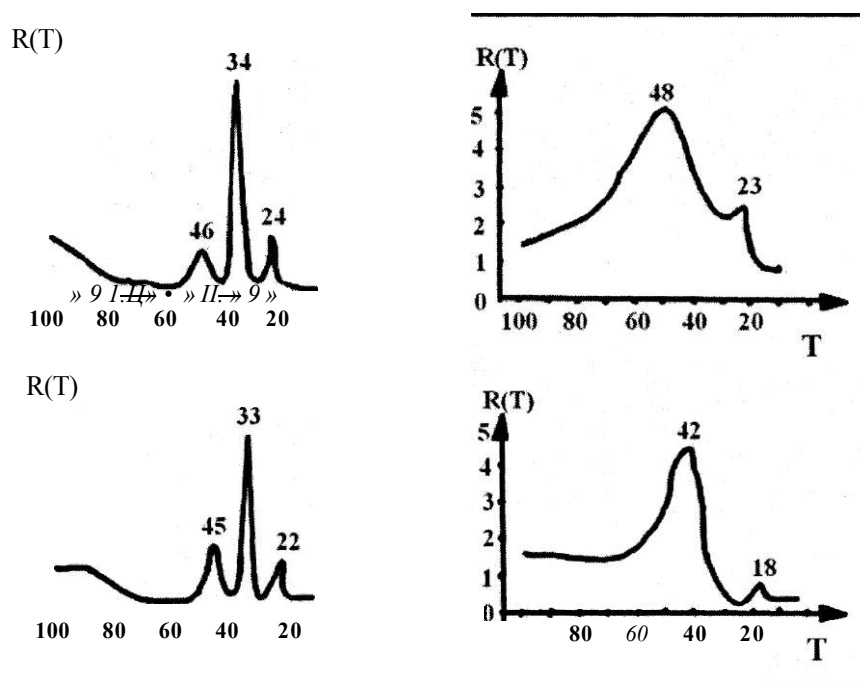


Рис. 51. Периодограммы сейсмической активности для землетрясений типа С с $M>7$ (более высокочастотные гармоники не показаны)

N - количество землетрясений; E - энергия землетрясений

лось выше, менее эффективен как при слишком малой длине временных рядов, так и при слишком большой длине временного ряда по отношению к периодам выделяемых гармоник.

Таким образом, для сильных землетрясений также характерна периодичность, содержащая гармоники 45 лет и 22 года.

Представляет интерес изучение распределения сейсмической активности в реальном масштабе времени. На рис. 52. приведен график сейсмической активности землетрясений типа С с $M > 7$. На графике представлено сглаженное число землетрясений во времени. Отчетливо выделяются циклы повышенной сейсмической активности с периодами 22-28 лет, попарно сгруппированные и образующие более крупные циклы с периодами 45-55 лет.

В табл. 13 приведены значения периодов времени между максимумами сейсмической активности и относительных амплитуд циклов активизации.

Для наглядности на рис. 53 приведены графики, отражающие соотношения периодов и относительных амплитуд циклов сейсмической активности, определенные по следующим формулам:

где T_n - период между максимумами циклов сейсмической активности; A_n - относительная амплитуда циклов сейсмической активности.

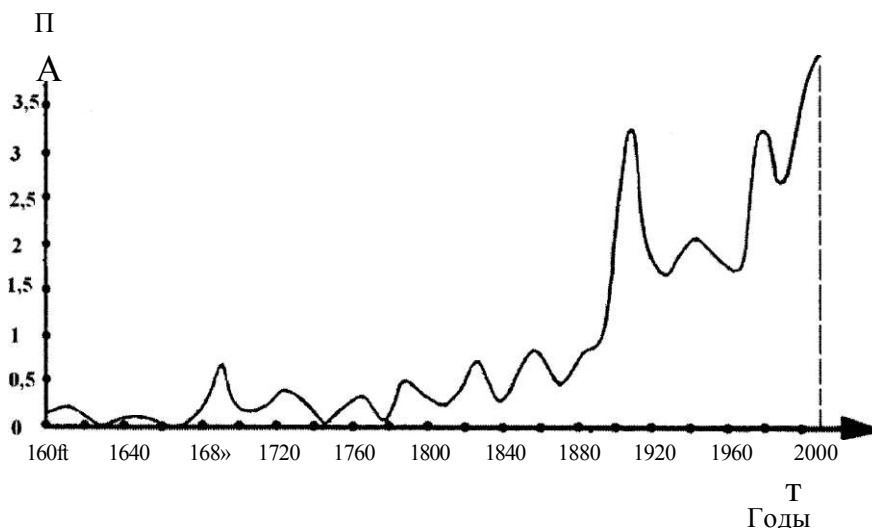


Рис. 52. График сейсмической активности землетрясений типа С с $M > 7$ за период времени с 1600 по 2000 годы

Таблица 13

Значения периодов времени между максимумами сейсмической активности и относительных амплитуд циклов активизации землетрясений типа С

Величина периода цикла Т (годы)	Значение относительной амплитуды А
34	0,2
47	0,1
31	0,7
41	0,2
25	0,3
36	0,4
32	0,55
48	0,5
36	3,1
	0,35

Чередование положительных и отрицательных частей графиков наглядно показывает попеременное возрастание и убывание периодов между максимумами сейсмической активности и относительных амплитуд циклов сейсмической активности. В табл. 14 приведены значения соотношений $T_{п}$ и $A_{п}$.

Таким образом, на основании изучения пространственно-временных закономерностей современной сейсмичности Земли нами сделаны следующие выводы:

- сейсмическая активность различных геодинамических поясов Земли обладает цикличностью, содержащей циклы с периодами в среднем 22 года и 45 лет;
- цикличность сейсмической активности по характеру совпадает с таковой вулканической активности;
- в проявлениях сейсмической активности установлена следующая закономерность: периоды времени между максимумами сейсмической активности, а также относительные амплитуды циклов активизации попеременно возрастают и

Таблица 14

Значения соотношений $T_{п}$ и $A_{п}$

$(T_{п21}/T_{п})$ 21	$(A_{п21}/A_{п})$ 21
-0,28	1
0,5	-0,9
-0,24	2,5
0,64	-0,3
-0,3	-0,3
0,13	-0,21
-0,3	0,01
0,33	-0,8
	7,9

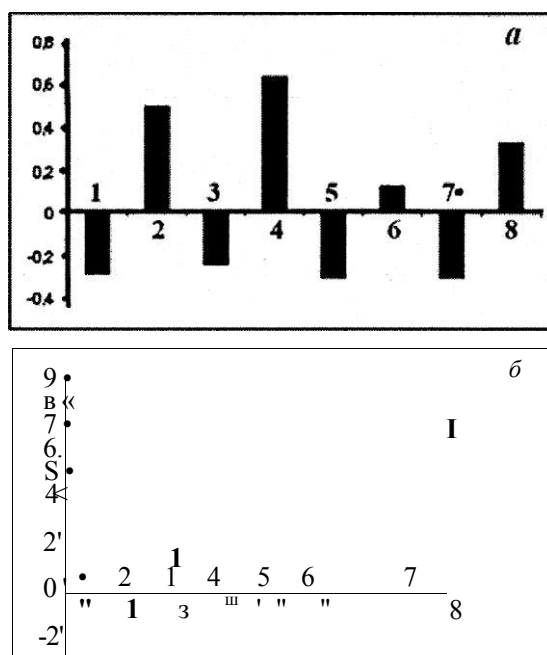


Рис. 53. Графики, отражающие соотношения периодов и относительных амплитуд циклов сейсмической активности для землетрясений типа С

а - график соотношений между периодами циклов сейсмической активности; б - график соотношений относительных амплитуд циклов сейсмической активности

убывают, то есть чем больше период сейсмического затишья, тем выше степень последующей активизации сейсмичности. Эта же закономерность наблюдается и в вулканических проявлениях;

- цикличность сильных землетрясений с $M > 7$ совпадает по характеру с такой слабой землетрясений с $M < 7$.

2.5. ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ ВУЛКАНИЗМА И СЕЙСМИЧНОСТИ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ДРУГИМИ КОСМИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

2.5.1. Возможная связь современных проявлений вулканизма и сейсмичности с космическими факторами

Периодичность землетрясений часто связывается с различными как эндогенными, так и экзогенными факторами. На наш взгляд, исследования по выявлению причинно-следственных и корреляционных связей между периодичностью сей-

смической активности и различными геофизическими и космическими факторами можно разделить на пять основных направлений:

Связь периодичности землетрясений с:

1. Лунно-солнечными приливами;
2. Солнечной активностью;
3. Чандлеровскими колебаниями;
4. Изменением скорости вращения Земли;
5. Атмосферными и другими процессами.

Помимо вышеуказанных, нам хотелось бы выделить еще один важный фактор, правомерность которого находит все больше подтверждений. Это положение Земли относительно других планет Солнечной системы, так же как и Солнечной системы в целом, на Галактической орбите.

Связь периодичности землетрясений с лунно-солнечными приливами

Изучением связи между периодичностью землетрясений и лунно-солнечными приливами занимались многие исследователи, в частности А.И. Елькин, Л.А. Латынина, П.С. Матвеев, М.В. Стюас, Д.Р. Вадву, L.A. Cotton, Th. Heaton, P. Hedervari, Л.Кнопов, K.Nagasava, А.Рийал, М. Shimshoni, I.F.Simpson, Б.Д. Зетлер и др.

А.И. Елькин рассматривает возможность влияния лунно-солнечных приливов на скорость процесса тектонических движений земной коры и как следствие - на возникновение землетрясений. На связь землетрясений с лунно-солнечными приливами указывает в ряде работ Г.П. Тамразян (1958, 1965). В работе Л.А. Латынина, С.Д. Ризаева (1985) предлагается изучать приливные деформации в зонах сейсмоактивных разломов с целью прогноза землетрясений. В частности, отмечается, что, если в результате процессов, подготавливающих землетрясение, упругие характеристики зоны разлома изменяются, это приводит к изменению интенсивности приливной волны.

П.С. Матвеев и В.Г. Голубицкий, проводя статистические исследования влияния приливообразующих сил Луны и Солнца на частоту землетрясений Закавказья, дают оценку зависимости частоты землетрясений от смены фаз Луны и от смены времени года. В то же время отмечается отсутствие статистической связи между приливым влиянием Солнца и частотой землетрясений.

В работе М.В. Стюаса (1963) приведен обзор работ по исследованиям связей сейсмичности и вулканизма с различными космическими процессами, в том числе лунно-солнечными приливами.

Так, Д.Р. Вадву на основании изучения высвобожденной энергии землетрясений за 65 лет приходит к заключению о влиянии расположения Нептуна и Урана по отношению к Земле, а также лунно-солнечных приливов на сейсмическую активность.

На незначительное влияние лунно-солнечных приливов на возникновение землетрясений указывает Гугенгейм. Ряд авторов, в частности Th. Heaton, П. Хедервари, считают, что приливы являются спусковым механизмом разрядки напряжений в недрах Земли. Отмечается также возможность применения зависимостей между сейсмичностью и приливно-приливными явлениями для прогноза землетрясений.

В работе К. Nagasawa (1973) на основании изучения землетрясений Японии с 1926 по 1970 гг. установлено, что для землетрясений с $M > 6$ наблюдается возрастание частоты более чем на 30% во время первой и последней четверти Луны.

А. Риал и др. (1966, 1968) указывают на возможность возбуждения микроземлетрясений земными приливами. В работе I.F. Simpson (1968) предлагается физический механизм влияния на период повторяемости землетрясений лунно-солнечных приливов, связанный с пересечением плоскости эклиптики с нормалью к плоскости разлома при землетрясениях. Слабая корреляция землетрясений юго-запада США и Тонга со временем лунно-солнечных приливов отмечена в работе Т. Simkin (1981), по данным землетрясений за 1966 г.

В работе Н.П. Булатовой (2005) выдвигается интересная идея влияния положения Солнца и Луны на широтное распределение сейсмичности Земли.

Рядом исследователей (Н.Н. Володичев и др. 2001) была установлена корреляция появления крупных землетрясений со временем фаз новолуния и полнолуния. Так, они пришли к выводу, что крупные серии землетрясений, эпицентры которых расположены на широтах $>40^{\circ}\text{N}$ и $>10^{\circ}\text{S}$, начинаются, как правило, в дни, отстоящие от времени фаз новолуния или полнолуния не более чем на 3 дня. К сожалению, авторы не сделали попытки рассмотреть механизм данного явления.

Связь периодичности землетрясений с солнечной активностью

Изучению связи периодичности землетрясений с солнечной активностью также посвящено много работ: Г.Я. Васильева, О.В. Лусманашвили, А. Сува, А.Д. Ситинского, П.М. Сычева, В.Д. Талалаева, Д. Тарлинга, М. Тарлинга и др. Различные авторы выдвигают существенно отличающиеся друг от друга физические механизмы этой связи. Однако мы не будем здесь подробно останавливаться на этом вопросе, так как ему будет посвящен самостоятельный раздел.

Связь периодичности землетрясений с чандлеровскими колебаниями

Ряд исследователей связывают вариации сейсмической активности с влиянием чандлеровских колебаний полюса Земли: Т. Окуда, П. Пинес, С.К. Ранкорн, С.А. Витин.

Так, в работе Т. Окуда установлена хорошая корреляция между временем возникновения сильных землетрясений с $M > 8$, происходящих в Тихом океане вблизи

северо-восточной части Японских островов и в Охотском море, и изменениями положения полюса. Сделано предположение, что изменения положения полюса могут приводить к движениям земной коры и перемещению океанских масс, что вызывает перераспределение напряжений в земной коре, приводящее к сильным землетрясениям. На связь сильных землетрясений с чандлеровскими движениями указывают С.К. Ранкорн, С.А. Витин.

С.К. Ранкорн предполагает, что возникающие при чандлеровских движениях напряжения в нижней мантии служат триггерным механизмом для землетрясений, что и объясняет их корреляцию с движением полюсов. Проведенные С.А. Витиным исследования по сопоставлению количества выделившейся при сильных землетрясениях энергии с суточным дрейфом полюсов с 1900 по 1970 годы позволили сделать вывод о высокой корреляции между двумя диаграммами (за исключением катастрофического землетрясения в Сан-Франциско 1906 года и Чилийского землетрясения 1960 года).

Однако большинство исследователей придерживается обратной точки зрения на механизм связи землетрясений с чандлеровскими колебаниями. Например, Л. Мансинха и Р.И. Миерсон считают, что сильные землетрясения сами являются одной из основных причин, вызывающих колебания полюса.

Как известно, сильные землетрясения производят существенные смещения масс в коре и в мантии. На основании этого факта делается предположение, что связанные с землетрясениями смещения масс приводят к изменениям тензора инерции Земли, вызывающим чандлеровские колебания. К близким выводам приходят также О'Коннели и А. Дзевонский. Лишь на основе анализа сильных землетрясений с 1901 по 1970 гг. установлена корреляция между периодами сейсмической активности и возмущениями в амплитудах чандлеровских колебаний. Наибольшие изменения амплитуд чандлеровских колебаний наблюдались в 1901-1910 гг. с максимумом в 1954 г., наименьшие - в 1910-1920 гг.

Исследуя корреляционную связь между изменениями в амплитуде чандлеровских колебаний и сейсмичностью Земли за период с 1918 по 1962 гг., Р.И. Миерсон (1970) установил отчетливую зависимость между числом глубоких и промежуточных землетрясений и движением полюса. В то же время корреляция амплитуды нутации с числом землетрясений с $M > 7,5$ является слабой (Миерсон, 1970).

Между тем существует ряд исследователей, в частности, Ф.А. Пахлен, Р.А. Хеирбич, Х. Кономори, опровергающих либо подвергающих сомнению связь землетрясений с чандлеровскими движениями. Так, Ф.А. Пахлен в 1973 г. оценил мощность чандлеровских колебаний, которые могли возбудиться при землетрясениях, происшедших с 1904 по 1964 гг. Показано, что вклад землетрясений явно недостаточен для того, чтобы возбудить чандлеровские колебания с амплитудой, определенной из астрономических наблюдений. Кроме того, оценка кумулятивного эффекта серии сильных землетрясений на движение полюса показывает, что максимально возможный эффект объясняет лишь 12% наблюдае-

мой амплитуды чандлеровской нутации, влияние атмосферных флуктуаций более значительно. Статистический анализ связи между изломами хода полюса и сильными землетрясениями с применением методов динамического программирования, проведенный Р.А. Хеирбичем и другими в 1970 году, показал, что имеется лишь незначительная и весьма ненадежная корреляция между этими явлениями.

Х. Кономори отмечает, что оценка сейсмического момента M_0 землетрясений по магнитуде M , измеренная на периоде 20 с, достигает насыщения и перестает быть мерой энергии или момента землетрясений. Из-за этой ошибки энергия землетрясений сильно завышается. На самом же деле прямой эффект землетрясений на порядок меньше того, который мог бы объяснить колебания Чандлера.

Связь периодичности землетрясений с изменениями скорости вращения Земли

На возможную связь периодичности сейсмической активности с вариациями угловой скорости вращения Земли указывали М.В. Стюарт (1962), Г.П. Тамразян (1972) и др. Так, М.В. Стюарт (1962) считал, что энергия вращения Земли играет большую роль в геотектонических процессах, в нарушении целостности земной коры, сопровождаемой сильными землетрясениями и вулканической деятельностью. В работе D.L. Anderson (1974) на материале наблюдений с начала XIX в. до настоящего времени установлена корреляция между графиками изменения скорости вращения Земли и графиком, показывающим энергию землетрясений, просуммированную за каждые 5 лет рассматриваемого интервала времени. В начале XX века было отмечено увеличение энергии землетрясений, совпавшее с замедлением вращения Земли.

П.Н. Кропоткин и Ю.А. Трапезников (1963) на основе изучения корреляции между изменениями скорости вращения Земли и суммарной энергией землетрясений пришли к выводу о тесной связи этих процессов.

Связь периодичности землетрясений с атмосферными и другими процессами

Определенное внимание исследователями уделяется возможности выявления связи между атмосферными процессами и сейсмичностью: Я.Г. Бирфельд, М.П. Зарайский, С.И. Зубков. В работе Я.Г. Бирфельда показано существование единой колебательной системы, охватывающей твердое тело Земли (ядро, мантия, земная кора), атмосферу и ионосферу. Важную роль в возбуждении колебаний Земли и неравномерностей ее вращения в работе отводится сейсмичности. Указана возможность воздействия сейсмичности Земли через посредство акустических волн на состояние ионосферы. Учитывая высокую чувствительность ио-

носферы к сейсмоакустическим колебаниям, Я.Г. Бирфельд предлагает использовать ионосферные явления для прогнозирования землетрясений.

М.П. Зарайский и С.И. Зубков (1975), изучая последовательность афтершоков Сочинского землетрясения 4.12.1970 г., обнаружили приуроченность большинства очагов к определенному времени суток. Так, обнаружена околополуденная концентрация с максимумами около 12 и 16 часов фоновых землетрясений с $K < 9$. Высказано предположение, что в основе выявленной закономерности лежит триггерное воздействие Солнца на напряженное состояние областей подготовки землетрясений.

Надо отметить, что высказываются также предположения о влиянии на сезонную периодичность землетрясений возможных вариаций гравитационной постоянной G . Так, проведя статистические исследования данных о частоте землетрясений по различным месяцам года (с 1904 по 1965 гг.), П.Н. Кропоткин и А.Е. Люстих выявили сезонную периодичность. По их мнению, вероятной причиной периодичности является изменение радиуса Земли, связанное с релятивистскими изменением активной гравитационной массы Земли.

Исследования японских ученых К. Моды и других также позволили установить сезонную неравномерность в распределении землетрясений Восточной Японии. Оказалось, что слабые землетрясения распределены равномерно. Землетрясения же с $M > 7,5$ сконцентрированы в определенных интервалах года. К близкому выводу приходит Т. Утсу.

Китайские исследователи Ю.Чин-янг и другие на примере сейсмически активных регионов Китая установили, что влияние сезонных вариаций вращения Земли на распределение во времени землетрясений зависит от строения данного региона.

Таким образом, краткий анализ существующих исследований по выявлению связи землетрясений с различными космическими и геологическими процессами и факторами привел нас к следующим выводам.

1. Практически каждый из авторов, пытающийся установить связь между землетрясениями и различными процессами, рассматривает эту связь в отрыве от других процессов, тем самым отдавая предпочтение выбранному им фактору как основному.

2. Выводы различных исследователей противоречивы, так как, говоря о связях землетрясений с другими процессами, в общей системе стохастической информации выбираются те гармоники, которые более всего подходят для объяснения выбранной автором модели механизма взаимосвязи. Это связано, на наш взгляд, с несовершенством методологических подходов и применяемого при выявлении скрытых периодичностей математического аппарата. Как известно, применяя в методах выявления скрытых периодичностей те или иные фильтры, подавляющие гармоники определенных частот, можно выделить гармоники, отражающие помехи, подавив при этом полезный сигнал. Эти аспекты более подробно были

рассмотрены в предыдущих разделах.

3. На наш взгляд, на общий ход геодинамических событий, отражением которых являются как извержения вулканов, так и землетрясения, оказывают влияние, в той или иной степени, все вышеперечисленные земные и космические факторы, включая лунно-солнечные приливы, солнечную активность, чандлеровские колебания, неравномерность суточного вращения Земли, атмосферные явления, расположение планет. Причем, как нам представляется, связь эта не односторонняя, а взаимная. Каждый из указанных процессов также в определенной степени испытывает влияние других процессов и, в свою очередь, сам оказывает на них определенное влияние. Кроме того, каждый из процессов обладает самостоятельной периодичностью, отличной от периодичности других процессов. Таким образом, огромное множество факторов, определенным образом влияющих друг на друга, образуют сложнейшую систему. Эта система подчиняется определенным закономерностям своих проявлений, образующимся в результате наложения взаимовлияния различных факторов. В этой результирующей системе могут появиться периодичности, никак не связанные с каким-либо из ее элементов в отдельности, но являющиеся следствием наложения различных факторов.

2.52. Солнечная активность

Наиболее активным из всех космических объектов, воздействующих на нашу планету, является Солнце. Даже приблизительные оценки показывают, что запасов термоядерного топлива в недрах Солнца достаточно для того, чтобы поддерживать его физическое состояние неизменным в течение 10^9 лет. Солнце ежегодно излучает энергию, равную $3 \cdot 10^{33}$ кал, являясь источником полного электромагнитного излучения и межпланетного облака плазмы, быстрых электронов, солнечных космических лучей и т.д. Наибольшая энергия теряется Солнцем в виде волнового излучения (Витинский, 1972, 1973, 1983). Полный поток энергии, излучаемый Солнцем в пространство, определяется экспериментально, исходя из потока энергии, приходящего на единицу площади земной поверхности, и называется солнечной постоянной (солнечная постоянная в среднем равна $1,95 \text{ кал/см}^2\text{-мин}$, или около 1360 Вт/м^2), причем полный поток лучистой энергии равен $3,8 \cdot 10^{26} \text{ Дж/с}$.

Масса Солнца равна $M = 1,9891 \cdot 10^{30} \text{ кг}$. Средняя плотность Солнца равна $1,41 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, причем от центра до расстояния $r = 0,8R$ Солнце содержит 0,99 своей массы, поэтому вблизи поверхности ($r = 0,995R$) его плотность составляет всего $2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$. Считается, что температура в центре Солнца равна $13,6 \cdot 10^6 \text{ К}$, плотность - $98 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$, давление - $2 \cdot 10^{16} \text{ Па}$. Из недр Солнца к поверхности тепловая энергия переносится двумя путями - электромагнитным излучением и конвекцией. В верхних слоях, на глубине 10^8 м от поверхности, энергия переносится в основном конвективным путем. Сверху конвективная зона ограничивается фото-

сферой толщиной $4 \cdot 10^5$ м, с температурой 6000К. Слой над фотосферой называют хромосферой, над которой расположена солнечная корона с температурой 10^6 К. В солнечной короне и верхней хромосфере образуются рентгеновское излучение и радиоизлучение.

Признаком усиления солнечной активности служит появление на его поверхности солнечных пятен. В 1908 году Хейл обнаружил, что пятна обладают магнитным полем, напряженность которого достигает 2000-4000 гаусс, в то время как напряженность общего магнитного поля Солнца не превышает один гаусс (Чижевский, 1969). Пятна в начале солнечного цикла появляются на широтах $30-40^\circ$, смещаясь затем к экватору с юга и с севера, достигая максимального числа около $10-20^\circ$, после чего число пятен уменьшается (Киселев, 1980).

Как показывают результаты исследований, продолжительность дрейфа солнечных пятен к экватору равна примерно 11 годам. В конце каждого 11-летнего цикла магнитное поле у полюсов меняет свою полярность. Таким образом, магнитный цикл Солнца равен 22 годам.

Факт изменения числа солнечных пятен со средней периодичностью 11 лет был установлен в середине прошлого столетия Г. Швабе и Р. Вольфом.

Х. Бэбкок (Babcock, 1969) предложил модель, объясняющую наличие 22-летнего магнитного солнечного цикла. По его мнению, всплывание магнитной силовой трубки к поверхности фотосферы сопровождается появлением вначале одного пятна - ведущего, а затем - второго. В соседних 11-летних циклах полярность ведущих пятен имеет разный знак.

Одним из наиболее распространенных индексов солнечной активности является относительное число солнечных пятен. Р. Вольф предложил определять индекс солнечной активности по следующей формуле:

$$W = k(10g + f), \quad (2.9)$$

где W - число Вольфа; g - число групп пятен на видимом солнечном диске; f - число пятен (включая ядра и поры) во всех группах. Значение коэффициента k зависит от многих факторов, включая особенности методики наблюдений, условий видимости в момент наблюдения, индивидуальных особенностей наблюдателя и др.

Другим индексом солнечной активности является суммарная площадь солнечных пятен, исправленная за перспективное сокращение по формуле:

$$S = \sum S_i S_e \theta_i, \quad (2.10)$$

где S - площадь 1-го пятна; $\theta = \arcsin(r/R)$; R - радиус видимого солнечного дис-

ка; г. — расстояние от его центра до рассматриваемого пятна.

Между S и W существует статистическая связь с коэффициентом корреляции $+0,85$ (Киселев, 1980). Уравнение регрессии S и W имеет вид (Витинский, 1976):

$$S = 16,7 W. \quad (2.11)$$

Существует еще несколько индексов солнечной активности, рассмотренных в работе Ю.И. Витинского (1973).

На рис. 54 приведен график изменений чисел Вольфа с 1749 г. по 2000 г.

Общепринята нумерация одиннадцатилетних циклов солнечной активности,

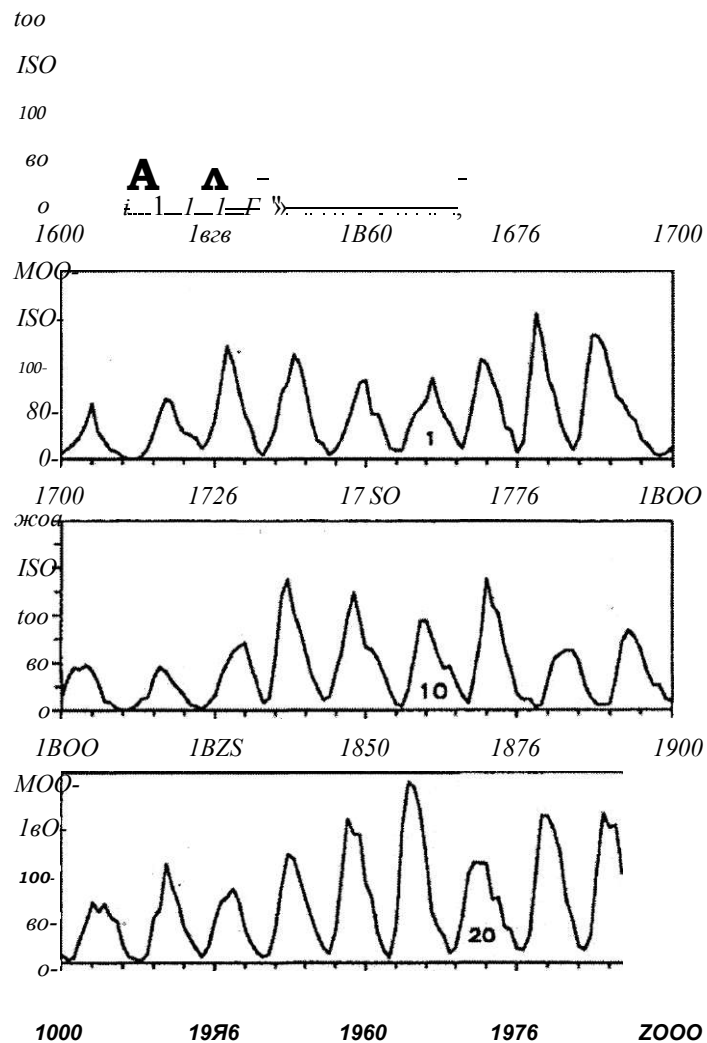


Рис. 54. График изменения чисел Вольфа (W)

в которой нулевой номер присвоен 11-летнему циклу с максимальным значением в 1750 году. Средняя продолжительность 11-летнего цикла считается равной 11,1 года. Однако длительность 11-летнего цикла существенно варьирует в реальности, причем при определении по эпохам минимумов период циклов варьирует от 9,0 до 13,6 лет, а по эпохам максимумов от 7,3 до 17,1 года (Витинский, 1972, 1973, 1983).

На рис. 55 показан спектр изменений чисел Вольфа с 1749 года по 1974 год по данным работы В.М. Киселева (1980). В спектре отчетливо выделяются гармоника с периодами 8,3; 9,8; 10,8; 25,6; 87,0. Спектральный анализ чисел Вольфа методом максимальной энтропии в работе Х.Р. Радоски позволил обнаружить более тонкую структуру 11-летнего цикла. Как видно, наиболее отчетливо в спектре выделяется 11-летний цикл и менее надежно 22-летний, соответствующий гармонике 25,6 года.

В работах Н.С. Джалилова, В.Н. Ораевского (2000) предложен физический механизм, с помощью которого циклическая активность Солнца рассматривается как проявление собственных колебаний всего Солнца. В частности, показано, что между центром Солнца и основанием конвективной зоны образуется своеобразный резонатор для низкочастотных вихревых волн типа Россби. В плоскости меридиана эти волны образуются между экватором и средними широтами. Учеными найден набор собственных частот этого резонатора, который содержит 11-22-летние периоды.

В то же время, если наличие 11-летних и 22-летних циклов солнечной активности признано многими исследователями, то циклы с более длительными периодами вызывают много споров. Это связано с ненадежностью данных наблюдений за солнечной активностью за период времени, превышающий 200 лет.

Д. Шове на основе анализа исторических сведений о наблюдениях солнечных пятен и полярных сияний приводит данные, позволяющие качественно судить об изменениях солнечной активности за последние 2000 лет (Витинский, 1973). Данные Д. Шове подтверждают реальность наличия в изменениях чисел Вольфа цикла с периодом 80-90 лет, а также позволяют выделить цикл со средней про-

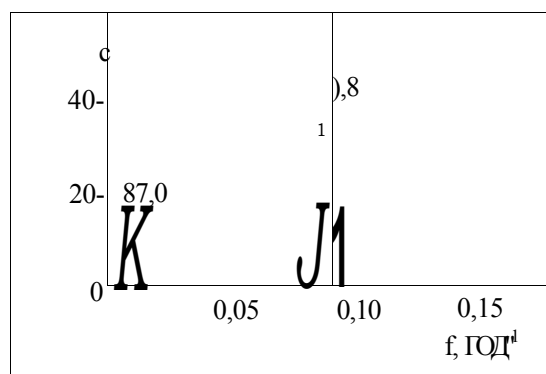


Рис. 55. Спектр изменений чисел Вольфа (W)



Рис. 56. Изменение длительности суток с исключенным линейным трендом (сплошная линия) и чисел короткоживущих солнечных пятен (пунктирная линия), по данным работы А. Стойко, Н. Стойко (1969)

должительностью 554 года (Витинский, 1983).

Попытка установить такую характеристику солнечной активности, в которой не преобладала бы 11-летняя цикличность, была сделана А. Стойко, Н. Стойко (1969). Ими были использованы для характеристики солнечной активности значения площади коротко живущих солнечных пятен $W_{\text{ж}}$, изменения которых за время с 1900 по 1963 гг. были сопоставлены с вариациями суточного вращения Земли (рис. 56). Эти два явления коррелируются с $K=(+08); (+09)$.

Накопленный обширный экспериментальный и теоретический материал о закономерностях проявления солнечной активности позволяет провести статистические сопоставления отдельных проявлений тектонической активности Земли с параметрами солнечной активности.

В последние десятилетия стало очевидным, что значимость влияния Солнечной активности на земные процессы значительно обширнее и глубже, чем ранее представлялось. Так, Б.М. Владимирский (2002) в своей работе пытается, на наш взгляд вполне правомерно, увязать многие высокочувствительные физические и химические процессы на Земле с влиянием различных компонентов солнечной активности. Приводятся интересные примеры влияния гелиосферных параметров на техногенные процессы.

2.5.3. Вулканизм и солнечная активность

Попытки выявления статистической связи между солнечной активностью и вулканическими проявлениями были сделаны в ряде работ: А.И. Абдурахманов, Н.К. Булин, Ш.Ф. Мехтиев, Э.Н. Халилов, С.В. Цирель.

Так, А.И. Абдурахманов, П.П. Фирстов и В.А. Широков (1976) высказали предположение о связи вулканических извержений с 11-летней цикличностью

солнечной активности. По мнению авторов, годы, неблагоприятные для извержений вулканов, лежат в окрестности максимума солнечной активности, тогда как наиболее благоприятные для извержений годы лежат вблизи минимума солнечной активности, в основном, в середине и конце спада солнечных циклов.

Б.М. Валяев и др. на основе изучения деятельности грязевого вулкана Ахтала (Грузия) пришли к выводу о существовании статистически достоверной связи активности грязевого вулкана Ахтала с солнечной активностью.

Однако результаты этих исследований отражают активность грязевых вулканов лишь только одного небольшого района нашей планеты. Представляет определенный интерес выявление связи между деятельностью грязевых вулканов Мира и солнечной активностью, которая в большей степени отразит специфику солнечно-земных связей.

Для выявления возможной связи между солнечной активностью и деятельностью грязевых вулканов, нами были проанализированы данные об извержениях крупнейших грязевых вулканов Мира и построен график, характеризующий изменение грязевулканической активности во времени. При построении использованы данные более 300 извержений вулканов Мира.

Сопоставление построенного графика грязевулканической активности с числами Вольфа, характеризующими 11-летний цикл солнечной активности, показало, что 9-12-летние периоды грязевулканической активности в основном совпали с 11-летними циклами солнечной активности (рис. 57).

Как было указано в предыдущем разделе, все грязевые вулканы расположены в зонах Заварицкого-Беньюфа и, следовательно, отражают деятельность процессов субдукции, т.е. повышению солнечной активности соответствует активиза-

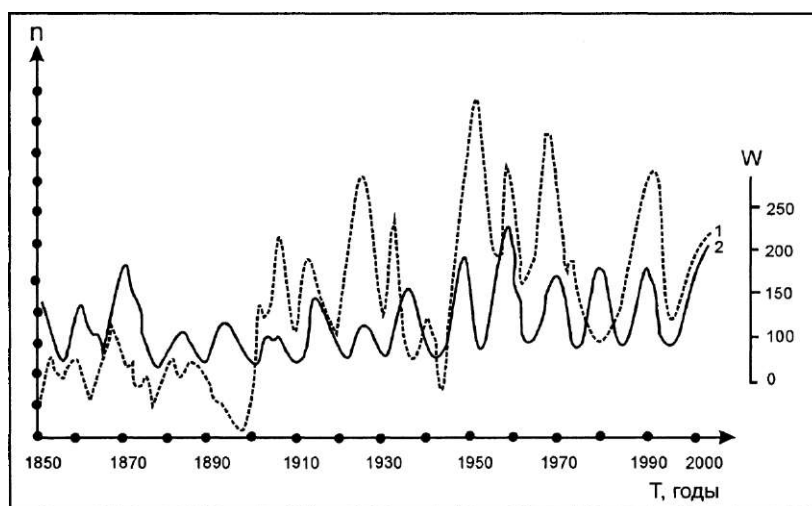


Рис. 57. Сопоставление графиков солнечной и грязевулканической активности

1 - график грязевулканической активности; 2 - график солнечной активности (числа Вольфа);
п - усредненное число извержений

ция процессов субдукции.

Как отмечалось выше, попытка выявить связь между активностью Солнца и деятельностью магматических вулканов была сделана рядом ученых. Однако при этом не учитывалось, что вулканы делятся на геодинамические типы, и каждый тип вулканов отражает деятельность различных процессов - сжатия и растяжения. Таким образом, делая выводы о периодах активизации вулканов на основе общего графика активизации для всех типов вулканов, исследователи исходят из предположения одновременности вулканов, одновременности процессов сжатия и расширения Земли, вследствие чего сохраняется неизменным и радиус.

Для выяснения наиболее объективной картины в деятельности магматических вулканов были составлены графики в отдельности для вулканов типов С и Р.

Каталоги извержений магматических вулканов Мира насчитывают около 1 000 действующих вулканов. Независимо от системы сбора информации об извержениях этих вулканов, не существует гарантии того, что за практически обозримый срок в каталогах отобрана вся имеющаяся информация об извержениях вулканов Мира. Потери информации неизбежны, но в общем случае они носят случайный характер.

Для того, чтобы максимально сократить влияние возможных потерь информации, были отобраны данные об извержениях вулканов за относительно короткий промежуток времени (с 1850 г. по 2000 г.), тогда как в каталогах приведены данные по извержениям вулканов с 1500 года до нашей эры по настоящее время.

Изучение активности магматических вулканов типа С позволило выявить определенную периодичность в их извержениях. Наиболее отчетливо выделились 9-15-летние циклы повышенной активности магматических вулканов.

Как видно из рис. 58, периоды повышенной активности вулканов типа С в основном совпадают с 11-летними периодами повышенной активности Солнца. В то же время сопоставление графика активности вулканов типа Р с графиком солнечной активности привело нас к противоположным заключениям. С увеличением солнечной активности понижается активность вулканов типа Р (рис. 59).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в периоды повышения солнечной активности повышается активность вулканов, характерных для зон субдукции, тогда как в периоды понижения солнечной активности увеличивается активность вулканов рифтовых зон, что должно вызывать периодическое изменение радиуса Земли. Результаты исследований позволяют предположить, что периоды сжатия Земли (за счет субдукции) сменяются периодами расширения (за счет спрединга).

Таким образом, исследования активности вулканов, проведенные нами с использованием линейного преобразования исходного ряда числа извержений вулканов посредством скользящего среднего, позволили установить, в среднем, 11-летнюю цикличность активности в различных геодинамических типах вулканов. При этом цикличности вулканов типа С и грязевых вулканов смещены по

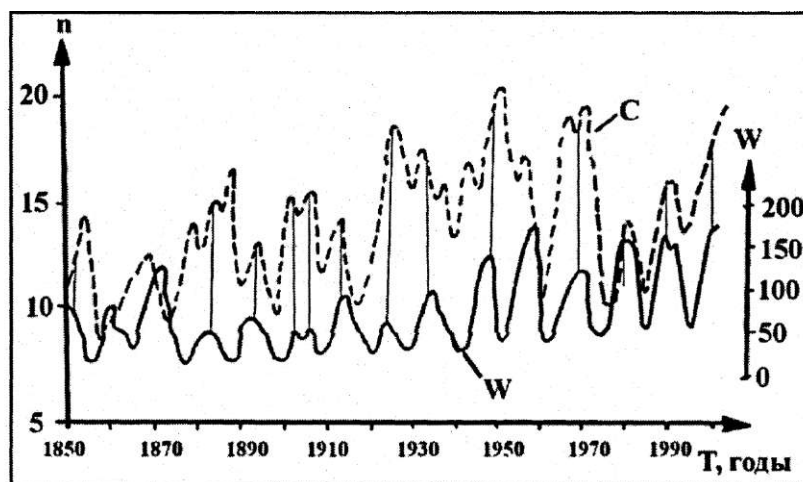


Рис. 58. Сопоставление графиков активности вулканов типа С и солнечной активности W

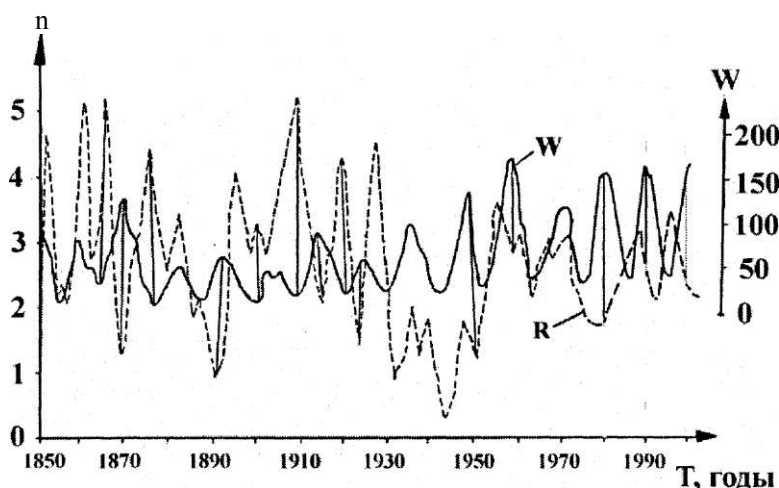


Рис. 59. Сопоставление графиков активности вулканов типа Р и солнечной активности
R - график активности вулканов типа Р; W - график солнечной активности

фазе относительно циклов активизации вулканов типа Р.

Однако, как указывалось выше, использование метода скользящих средних для выявления циклов активизации вулканов обладает рядом существенных недостатков. Так, каждый вариант сглаживания отфильтровывает циклы с периодами, длительность которых меньше или равна длине интервала сглаживания. Следовательно, для полного анализа стохастических процессов и выявления периодов различной длительности необходимо использование большого числа вариантов

сглаживания с различной длиной интервалов сглаживания. Более эффективным для проведения такого рода анализа является нелинейное преобразование исходного ряда, например, методами Ланцоша или максимальной энтропии.

Нами были оценены функции спектральных плотностей извержений различных типов вулканов, а также чисел Вольфа. Проведенные расчеты привели к интересным результатам. В извержениях всех геодинамических типов вулканов были выявлены циклы активизации, сходные с циклами солнечной активности. В табл. 15 приведены периоды циклов активизации вулканов и чисел Вольфа.

Таблица 15

Значения периодов чисел Вольфа и циклов активизации вулканов различных типов

Числа Вольфа	Периоды циклов активизации (в годах)		
	Извержения вулканов типа С	Извержения грязевых вулканов	Извержения вулканов типа Р
5,6	6	6	5
8,4	8	9	9
11,2	10	12	11
14	14	14	15
22	22	22	22

Таким образом, выявлены единые циклы в деятельности всех типов вулканов и солнечной активности с периодами 5-6 лет, 8-9 лет, 10-12 лет, 14-15 лет и 22 года.

На рис. 60 отчетливо видно сходство в циклах активизации различных геодинамических типов вулканов и солнечной активности, при этом в числах Вольфа наиболее ярко выделяются 11-летние циклы, в активизации вулканов типа С - циклы длительностью 6, 10 и 22 года, вулканов типа Р - 15-летние и 22-летние циклы и в активизации грязевых вулканов - 9-летние и 22-летние циклы активизации.

Как видно, 22-летние циклы наиболее ярко проявляются во всех геодинамических типах вулканов и, по-видимому, генетически связаны между собой влиянием единого фактора, которым, возможно, является 22-летний цикл солнечной активности.

Таким образом, периодограммный анализ извержений вулканов и солнечной активности позволил более детально разобраться в их циклах, дополнительно выявить циклы с различными периодами.

Можно ли назвать случайным сходство циклов в солнечной активности и извержениях различных геодинамических типов вулканов? На наш взгляд - нет. Конечно, вполне возможно, что некоторые из выявленных циклов связаны с сугубо эндогенными глобальными процессами.

Тем не менее, по нашему мнению, наиболее характерные для солнечной активности 11-летний и 22-летний циклы оказывают непосредственное влияние на

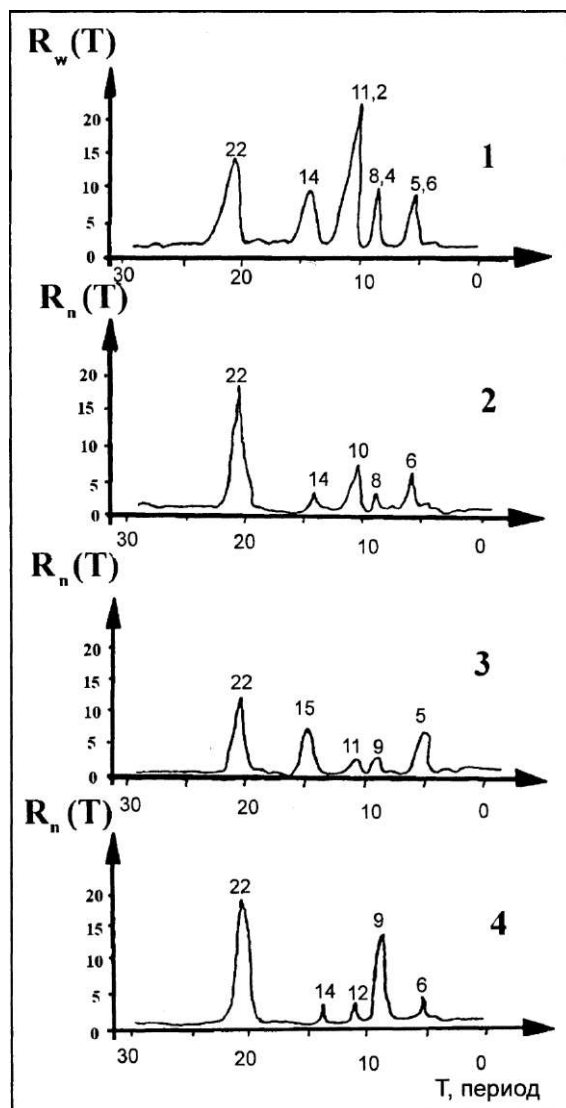


Рис. 60. Периодограммы извержений вулканов и изменений чисел Вольфа

1 - периодограмма изменений чисел Вольфа; 2, 3, 4 - периодограммы извержений вулканов, соответственно, типов С, Р и Гр

ход земных процессов, в том числе на вулканизм и сейсмичность. Один из возможных механизмов влияния солнечной активности на геодинамические процессы описывается нами ниже.

Во время повышения солнечной активности резко усиливаются корпускулярное излучение и напряженность магнитного поля Солнца, индуцирующие кольцевые токи в различных слоях Земли, в частности, в литосфере и астеносфере.

Возникшие в результате повышения солнечной активности токи в астеносфере вызывают нагрев мантии, увеличение ее пластичности и, как следствие, ускорение конвективных потоков. Ускорение конвективных потоков приводит к ускорению спрединга, а увеличение температуры мантии - к ее тепловому расширению, при этом расширение Земли происходит за счет спрединга. В периоды понижения солнечной активности величина кольцевых токов, индуцируемых в мантии, уменьшается, вследствие чего происходит ее остывание и сжатие Земли, сопровождающееся процессом субдукции в зонах Заварицкого-Беньофа. Разница во времени от момента повышения солнечной активности до ускорения процесса спрединга составляет не менее 5-7 лет, в связи с протеканием ряда процессов, начиная с возникновения кольцевых токов и кончая повышением температуры мантии, что обуславливается тепловой инерцией пород мантии. Указанный промежуток времени способствует запаздыванию пульсации Земли на пол-периода относительно 11-летних циклов солнечной активности. Это приводит к тому, что процесс спрединга активизируется во время спада солнечной активности, тогда как процесс субдукции активизируется во время повышения солнечной активности.

Таким образом, результаты вышеописанных исследований позволяют предположить, что периодичность активности Солнца оказывает воздействие на периодичность геодинамических процессов.

254. Сейсмичность и солнечная активность

Установление статистической связи между временем активизации вулканов и солнечной активностью позволяет предположить наличие подобной связи и между солнечной активностью и сейсмичностью Земли. Предпосылкой к такому предположению является общеизвестный факт наличия геодинамической и корреляционной связи между вулканизмом и сейсмичностью.

Как следует из результатов вышеописанных исследований, солнечная активность оказывает различное влияние на активизацию извержений вулканов рифтовых зон, отражающих активность процессов растяжения литосферы, и на активизацию вулканов поясов сжатия Земли. Как известно, пояса сжатия и растяжения литосферы Земли также характеризуются высокой сейсмичностью, что предопределяет, по-видимому, такую же связь сейсмичности с солнечной активностью.

Изучению статистических связей между параметрами солнечной и сейсмической активности посвящены работы Ю.Д. Буланже, Г.Я. Васильева, Ю.Д. Калинина, О.В. Лусманашвили, В.Д. Талалаева, А.Д. Сытинского, П.М. Сычева, И.К. Грибина, Ф.А. Макадоав, И.Ф. Симеона, И.В. Ананьина, А.О.Фадеева и др.

Г.Я. Васильева и В.И. Кожанчиков на основании исследования около 2000 землетрясений различных регионов Земли за период одного цикла солнечной

активности, с 1962 по 1973 гг., пришли к выводу, что число поверхностных землетрясений увеличивается с усилением солнечной активности, а число глубокофокусных - уменьшается в эпоху максимума солнечной активности. Сейсмическая активность для всех землетрясений как в годы максимума, так и минимума солнечной активности на 10-30% выше, когда планета пересекает проекцию галактического магнитного поля на плоскость эклиптики. Утверждается, что землетрясения имеют электромагнитную природу и связаны со структурой магнитосферы. В работе Ю.Д. Буланже (1984) сопоставляется число землетрясений в сейсмоактивных зонах СССР с солнечной активностью, на основе чего также предполагается наличие связи между этими явлениями. Ю.Д. Калинин (1974), сопоставляя данные о землетрясениях за периоды 1897-1958 гг. и 1963-1968 гг. с солнечной активностью, отмечает, что области повышенной сейсмической активности последовательно появляются внутри 11-летнего солнечного цикла на географических широтах, все более удаленных от северного полюса. Предполагается влияние на сейсмическую активность солнечного ветра.

В последующей работе Ю.Д. Калинин, развивая предложенную гипотезу, указывает, что изменения солнечной активности обуславливают нерегулярные колебания угловой скорости вращения Земли, что в свою очередь влияет на сейсмическую активность.

В работах О.В. Лурсманашвили (1972, 1973) отмечается возможность влияния активности Солнца на распределение землетрясений Кавказа. Рассматривая землетрясения Кавказа с 1900 по 1970 гг., О.В. Лурсманашвили приходит к выводу, что существует тесная связь, с одной стороны, между сейсмической активностью Кавказа и колебанием уровня Каспийского моря и, с другой стороны, между изменением уровня моря и активностью Солнца. Сравнение спектров активности Солнца и повторяемости сильных землетрясений Кавказа показало их высокое сходство.

А.Д. Сытинский в ряде работ (с 1963 по 1998 годы), П.М. Сычев (1964), В.Д. Талалаев (1980) также пытаются установить связь сейсмичности Земли с солнечной активностью. Ими, в частности, отмечается, что общая сейсмичность Земли, выраженная через суммарную энергию землетрясений и число катастрофических землетрясений за год, зависит от фазы 11-летнего солнечного цикла. Наиболее высокая сейсмическая активность соответствует эпохам максимума и минимума 11-летнего солнечного цикла. Указано также, что землетрясения главным образом происходят через 2-3 дня после прохождения активной области через центральный солнечный меридиан. В работе А.Д. Сытинского (1973) отмечено, что связь сейсмичности с солнечной активностью осуществляется через общепланетарные атмосферные процессы. Механизм зависимости состоит в том, что в связи с усилением солнечной активности происходит возмущение квазистационарного состояния атмосферы, приводящее к перераспределению массы атмосферы по земному шару, т.е. к перемещению центра тяжести системы Земля - атмосфера, и, следовательно, к нарушению фигуры Земли. Так, А.Д. Сы-

тинский (1998) отмечает, что полученная им ранее зависимость сейсмичности от 11-летнего цикла была проверена и подтверждена опытным прогнозированием общей сейсмичности Земли и отдельных ее регионов. Были предсказаны максимумы сейсмической активности Земли за период с 1963 по 1995 гг. И.В. Ананьин и А.О.Фаддеев (2002) приходят к выводу о наличии корреляционной связи между вариациями сейсмической активности, средними годовыми температурами на поверхности Земли и солнечной активностью. Между тем, они рассматривают эту связь, как возможное обоснование влияния солнечной активности как на среднегодовые температуры, так и на сейсмическую активность.

В большинстве работ солнечная активность рассматривается в качестве спускового механизма к разрядке напряжений в недрах Земли.

В работе В.М. Лятхера отмечено, что ход изменений среднего интервала между сильными землетрясениями согласуется с изменениями длины солнечного цикла. В частности, отмечается, что в вариациях солнечной активности наблюдается квазипериодическая компонента с периодом примерно 60-100 лет. Обнаруженная корреляция между солнечной активностью и частотой сильных землетрясений позволяет утверждать, что и локальные характеристики сейсмичности, определяемые на ограниченном во времени статистическом материале, могут изменяться во времени примерно с той же периодичностью, что и сглаженные длины солнечных циклов. Между тем необходимо отметить, что существуют также работы, в которых опровергается возможность связи с солнечной активностью сейсмичности Земли. Так, Ван-Жиль, проведя анализ более чем 20000 слабых землетрясений, произошедших с 1910 по 1945 годы, отметил отсутствие связи между солнечной активностью и сейсмичностью.

С целью выявления возможной связи солнечной активности с процессами сейсмичности Земли нами были проведены следующие исследования. Был произведен спектральный анализ временных рядов землетрясений различных геодинамических типов: тип С, тип ОР, тип КР и тип ОВ. Надо отметить, что производилось раздельное изучение периодичности слабых землетрясений ($M < 7$) и сильных землетрясений с $M > 7$. 99% землетрясений с $M > 7$ происходит в поясах сжатия Земли, в связи с чем изучение периодичности сильных землетрясений производилось только для типа С.

Спектральный анализ временных рядов землетрясений производился методом максимальной энтропии, при этом длина фильтров выбиралась с учетом необходимости изучения высокочастотной составляющей спектра ($\tau < 30$). Результаты изучения спектральных особенностей временных рядов землетрясений с $M > 7$ показали, что большая часть гармоник в спектрах землетрясений и чисел Вольфа совпадает. В табл. 16 приведены периоды гармоник чисел Вольфа и землетрясений с $M > 7$.

Из рис. 61 видно, что характерными в спектрах являются гармоники с $T = 18$ -22 года, 10-11 лет и 8 лет. Надо отметить, что в спектре, охватывающем временной ряд землетрясений с 1600 по 2000 годы, указанные гармоники выявлены

Таблица 16

Значения периодов чисел Вольфа и циклов активизации землетрясений типа С с $M>7$ за разные промежутки времени

Числа Вольфа	Периоды циклов активизации	
	Землетрясения типа С с $M>7$	
	1600-2000 годы	1902-2000 годы
5,6	-	6
8,4	8	8
11,2	11	10
14	15	-
22	22	18

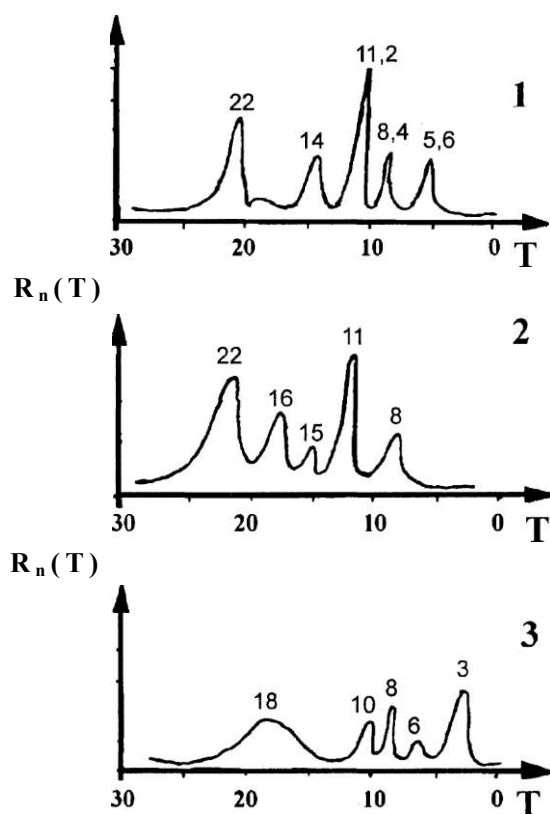


Рис. 61. Периодограммы изменений чисел Вольфа и сейсмической активности (для землетрясений типа С)

1 - периодограмма изменений чисел Вольфа; 2 - периодограмма изменений сейсмической активности для землетрясений с $M>7$, за период времени с 1600 по 2000 гг.; 3 - периодограмма изменений во времени выделившейся сейсмической энергии землетрясений типа С с $M>7$, за период времени с 1902 по 2000 гг.

более четко, чем в таковом за 1902-2000 годы. Это объясняется нами спецификой применяемой методики, эффективность которой увеличивается при увеличении длины исходного ряда.

Как видно из приведенных спектров, наиболее четко в них проявляется 22-летняя и 11-летняя цикличность.

Интересные результаты также получены при изучении спектров землетрясений с $M < 7$. Большое число слабых землетрясений позволило произвести статистически объективную обработку данных по землетрясениям всех геодинамических типов: С, ОР, ОВ, КР за период с 1902 по 2000 годы.

На рис. 62 показано сравнение спектров землетрясений типов С и ОР с графиком солнечной активности. Как видно, близкими в спектре являются гармоники с

RJT)

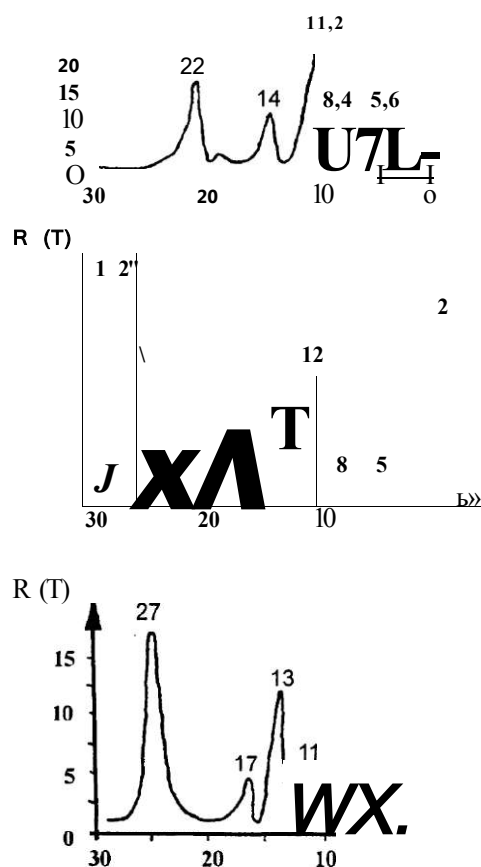


Рис. 62. Периодограммы изменений чисел Вольфа и сейсмической активности

1 - периодограмма изменений чисел Вольфа; 2, 3 - периодограммы сейсмической активности для землетрясений, соответственно, типов С и ОР с $M < 7$, за период времени с 1902 по 2000 гг.

$T=5, 11-12, 13-14, 22-24$. Гармоника с $T=8$ проявляется лишь в спектре землетрясений типа "С". Сравнение спектров землетрясений типов КР и ОВ со спектром солнечной активности (рис. 63) показало также наличие ряда сходных гармоник: 7-9 лет, 9-12 лет, 19-22 года. В спектре землетрясений типа "КР" не проявляется 5-летняя гармоника, а в спектре землетрясений типа ОВ - 14-летняя.

В то же время можно заметить сходство между спектрами землетрясений типов С и ОР, а также ОВ и КР (см. рис. 62.) Между тем, спектры землетрясений типов С и ОР менее сходны с таковыми типов КР и ОВ (см. рис. 63).

Идентичная закономерность наблюдалась и в низкочастотных спектрах извержений вулканов, при этом в характере извержений вулканов типов С и ОР проявлялось высокое сходство, тогда как спектры извержений вулканов типов ОВ и КР также были идентичными.

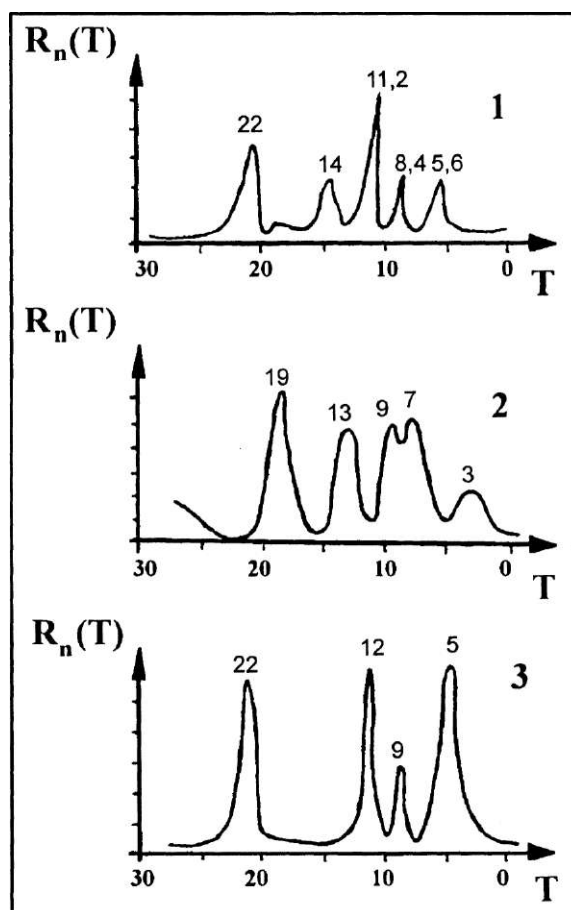


Рис. 63. Периодограммы изменений чисел Вольфа и сейсмической активности

1 - периодограмма изменений чисел Вольфа; 2, 3 - периодограммы сейсмической активности для землетрясений, соответственно, типов КР и ОВ с $M < 7$, за период времени с 1902 по 2000 гг.

Таблица 17

Значения периодов гармоник в числах Вольфа и в извержениях вулканов типов С, ОР, КР и ОВ

Периоды циклов активизации				
Числа Вольфа	Тип С	Тип ОР	Тип КР	Тип ОВ
5,6	5	5	-	5
8,4	8	-	7	9
11,2	12	11	9	12
14	14	13	13	-
22	27	27	19	22

В табл. 17 приведены периоды гармоник в числах Вольфа и в извержениях вулканов типов С, ОР, КР и ОВ.

Представляет определенный интерес сопоставление графиков активности сильных землетрясений ($M > 7$) и чисел Вольфа. Это позволит изучить процесс связи сейсмичности с солнечной активностью в реальном масштабе времени.

На наш взгляд, неправомерным является упрощенное понимание связи тектонических процессов с солнечной активностью. Известно, что солнечная активность влияет на климатические процессы, изменения уровня Мирового океана, в свою очередь, влияющие на энергетическое состояние литосферы и мантии и, как следствие, на тектонические процессы. Так, Г.С. Иванов-Холодный (2000) отмечает, что инициированные солнечной активностью процессы ионизации ионосферы имеют разный характер в зависимости от высоты. Была предложена теория расчета степени влияния Солнечных вспышек на процессы ионизации различных слоев ионосферы. В то же время отмечается, что механизм влияния солнечной активности на геофизические процессы весьма многогранен и требует пристального многостороннего исследования.

Важно понимание того, что само понятие солнечной активности весьма сложно и многогранно, поэтому остановимся чуть подробнее на процессах, происходящих на Солнце в этот период.

Как было отмечено выше, интервалы между соседними минимумами солнечной активности составляют от 8 до 14 лет, а в среднем 11.1 г. (**закон Швабе-Вольфа**). В начале цикла пятен на Солнце почти совсем нет. Потом за 3-7 лет их количество увеличивается до максимального значения числа Вольфа $W = 50-200$. После этого в течение 5-10 лет значения W снова уменьшаются до минимума. С учетом чередования в соседних циклах последовательности магнитной полярности пятен биполярных групп (**закон Хейла**), физически более обоснован 22-летний цикл солнечной активности (**цикл Андерсона, 1939**). Имеются данные о существовании более продолжительных циклов: 35-летнего (**цикл Брюкнера, 1890**), векового (80-130 лет) и еще более длительных.

В конце XX в. выяснилось, что в солнечной активности присутствует **квазидвухлетний период**, типичный для ряда геофизических явлений. Одним из основных показателей солнечной активности являются солнечные пятна. На рис.

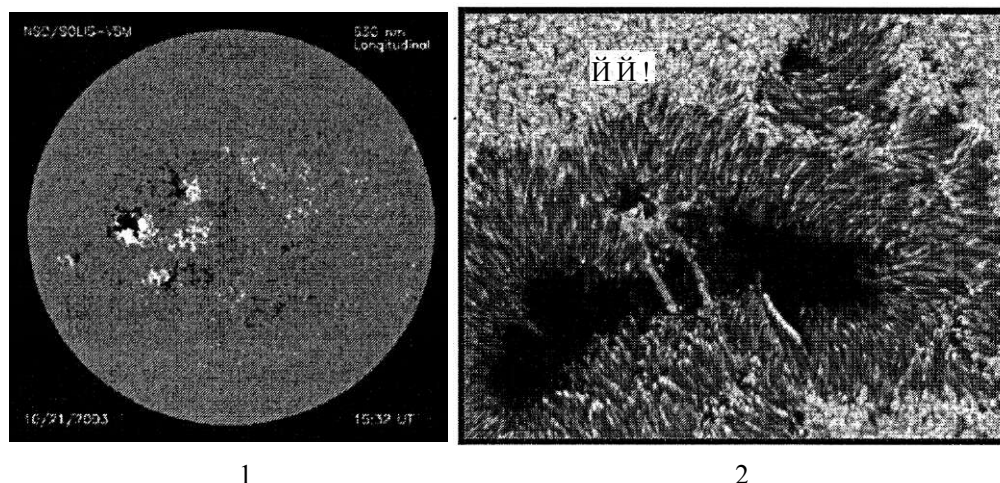


Рис. 64. Магнитограмма активного солнца (1) и структура солнечного пятна (2) www.kosmofizika.ru/ucheba/sun_act.htm

1 - белые (S) и черные (N) области различной полярности нескольких групп пятен. Серый фон - слабые поля спокойной атмосферы

64 показаны магнитограмма активного солнца с хорошо видными солнечными пятнами и структура пятен.

По нашему мнению, чрезвычайно важен сам факт наличия в тектонических процессах циклов, сопоставимых с периодами солнечной активности. Если же учесть сложность взаимосвязей и инертность многих физических и химических процессов, то смещение одних циклов относительно других во времени становится очевидным.

Выводы

Необходимо отметить, что в процессе детального анализа высокочастотных составляющих спектров временных рядов извержений вулканов и землетрясений, вычисленных также при различных длинах фильтра, выяснилось следующее:

1. Наиболее устойчивыми высокочастотными составляющими спектров являются гармоники с T-22-24 года и T-10-12 лет.

2. При изучении спектров распределения извержений вулканов во времени установлено:

а) высокочастотные составляющие извержений вулканов типов С, Р и Гр сходны между собой, а также со спектром чисел Вольфа, при этом периоды гармоник в различных спектрах отличаются, в среднем, не более чем на 1 год;

б) однозначно на всех спектрах извержений вулканов и чисел Вольфа выделена гармоника с T=22 года.

3. Изучение спектров распределения числа землетрясений во времени показало следующее:

а) в спектрах сильных ($M > 7$) и слабых ($M < 7$) землетрясений однозначно выделяются лишь гармоники с $T \approx 20-23$ года;

б) в спектрах землетрясений с $M > 7$ и чисел Вольфа также выявлены сходные гармоники с $T \approx 10-11$ лет и с $T \approx 8$ лет;

в) спектральный анализ временных рядов слабых землетрясений показал, что наиболее близким характером спектров обладают землетрясения типов КР и ОВ. Эти результаты согласуются с выявленными закономерностями в извержениях вулканов, особенно в низкочастотных составляющих спектров ($\tau > 20$);

г) спектры временных рядов слабых землетрясений содержат гармоники с периодами, характерными для спектра солнечной активности: $T \approx 22-24$, $T \approx 12-14$, $T \approx 10-12$, $T \approx 5$.

Проведенные исследования позволяют нам предположить различное влияние 11-летних и 22-летних циклов солнечной активности на проявления современной тектонической активности Земли, отражением которой в поясах сжатия и растяжения Земли являются извержения вулканов и землетрясения.

2.6. ДОЛГОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ

Выявление цикличности в сейсмической и вулканической активности и их корреляционных связей с солнечной активностью и другими космическими процессами имеет важное значение для понимания взаимодействия различных космических и геодинамических факторов и создания единой концептуальной системы космо-земных взаимодействий.

Весьма интересной является попытка прогнозирования очередного 24 цикла солнечной активности. Для любых прогнозов прежде всего создаются модели процессов, на основе которых осуществляется их прогнозирование на будущее. Наиболее точную модель зарождения солнечных пятен разработала в 2004 году группа ученых, работающая под руководством доктора Маусуми Дикпати из Национального Центра атмосферных исследований США (NCAR). По их расчетам, магнитные структуры, формирующие пятна, зарождаются в районе экватора Солнца. Там они «впечатываются» в плазму и вместе с ней движутся к полюсам. Достигнув полюса, плазма погружается вовнутрь звезды на глубину порядка 200 тыс. км. Оттуда она начинает течь обратно к экватору со скоростью 1 м/сек. Один такой круг соответствует циклу солнечной активности в 17-22 года. Свою модель исследователи назвали «моделью динамо-транспортировки магнитного потока». Сейчас мы находимся в начале 24-го 11-летнего солнечного цикла. Заложив в модель данные о 22-х, предшествующих 23-му циклу, ученые просчитали, каким должен стать 23-й цикл. Результат совпал с тем, что мы наблюдаем, на 98%. Проверив, таким образом, свою модель, исследователи в начале 2006 года рассчитали

24-й цикл солнечной активности, пик которого придётся на 2012 год. Прогнозируется, что 24-й цикл солнечной активности будет в 1,5 раза мощнее предыдущего 23-го (<http://www.wdcb.ru/stp/Cic23w.doc>).

Ниже приводится прогнозный график солнечной активности (рис. 64а), составленный авторами настоящей работы на основе анализа существующих предшествующих данных и прогнозов американских исследователей.

На графике видно, что в 2012 году ожидается не только пик 24-го, особенно мощного, И-летнего цикла солнечной активности, но и пик четвертого 75-85-летнего цикла (F). Этот цикл показан в виде огибающей максимумов 11-летних циклов солнечной активности. Как видно из графика, на этот период приходится также максимум еще одного, более крупного, предположительно 300-летнего, цикла солнечной активности (L), фрагмент которого также показан на графике.

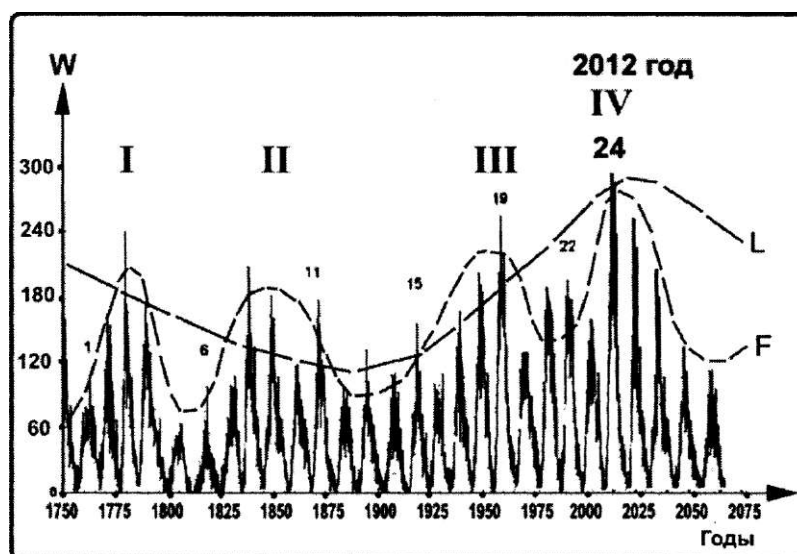
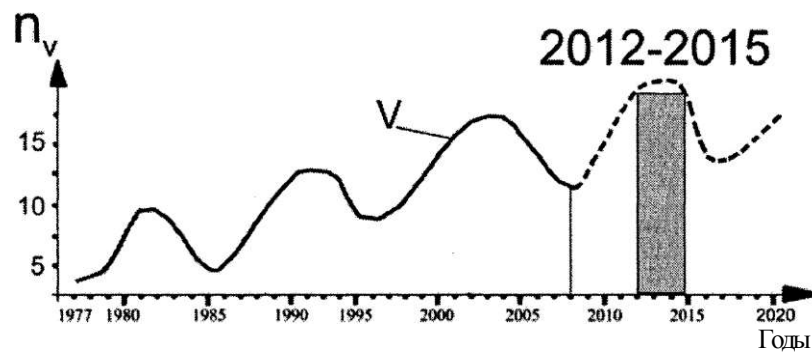


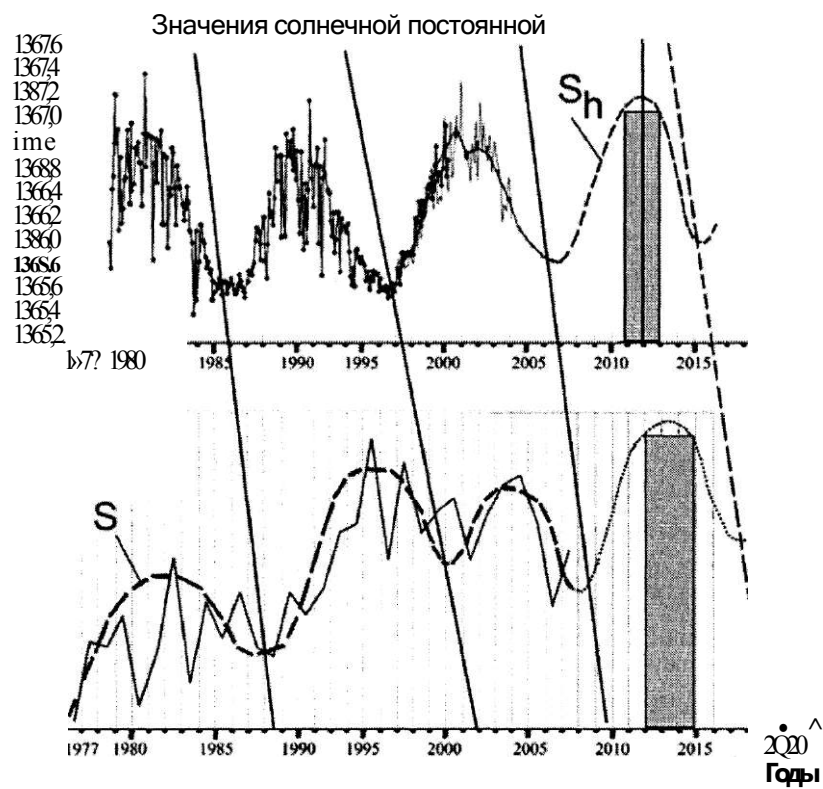
Рис. 64а. Прогнозный график солнечной активности

Рис. 64б. Прогнозные графики солнечной активности, сейсмической и вулканической активностей поясов сжатия Земли

- 1 - график реальных чисел землетрясений поясов сжатия Земли с M35;
- 2 - огибающий график сейсмической активности поясов сжатия Земли с M35;
- 3 - прогнозная часть графика сейсмической активности поясов сжатия Земли;
- 4 - прямые, соединяющие минимальные значения солнечной и сейсмической активностей и демонстрирующие запаздывание сейсмической активности по отношению к солнечной;
- 5 - график вулканической активности поясов сжатия Земли;
- 6 - прогнозная часть графика вулканической активности поясов сжатия Земли;
- 7 - обозначение графика вулканической активности;
- 8 - обозначение графика сейсмической активности.



S_b Вт/м²



1	2	3	4
5	6	7	8

Амплитуда 24 цикла завышена авторами на 20% по сравнению с прогнозами NCAR, что объясняется своеобразным резонансом в результате наложения циклов трех порядков.

Между тем, исследование закономерностей в цикличности вулканизма и сейсмичности позволяет решить не менее важную практическую задачу - осуществление долгосрочного прогноза активности вулканов и землетрясений. Поэтому нам представляется весьма интересным и важным осуществление подобного долгосрочного прогноза на основе результатов масштабной и кропотливой работы по изучению пространственно-временных закономерностей современных проявлений вулканизма и сейсмичности.

На рис. 646 приведены прогнозные графики до 2018 года как солнечной активности, так и сейсмической и вулканической активностей поясов сжатия Земли. Как видно из рисунка, нами использована в качестве показателя солнечной активности не кривая чисел Вольфа, а график изменений во времени солнечной постоянной, так как именно эта характеристика имеет энергетическое выражение (<http://www.kosmofizika.ru/ucheba/sun/564.jpg> <http://www.kosmofizika.ru/ucheba/sun/68.jpg>).

Необходимо отметить, что солнечная постоянная имеет высокую корреляцию с числами Вольфа, что вполне логично.

Даже визуальное сравнение графиков позволяет заметить их высокое сходство и некоторое запаздывание во времени циклов сейсмической и вулканической активности поясов сжатия Земли по отношению к солнечной активности. Время запаздывания варьирует от 1,5 лет до 2-х лет. Обоснование механизма такого запаздывания было приведено в предыдущих разделах, в частности, в разделе 2.4.2.

Начиная с 2008 года приведены прогнозные части графиков, которые составлены на основании использования предшествующих, стабильно сохраняющихся длительное время, закономерностей, в частности, установленных циклов повышенной активности рассматриваемых процессов.

На всех трех графиках показан очередной цикл активности, равный по своему периоду в среднем 11-12 годам. Как видно из графика, максимум цикла повышенной солнечной активности приходится на 2012 год. Между тем максимумы циклов вулканической и сейсмической активностей поясов сжатия Земли приходятся на 2012-2015 годы, учитывая наблюдаемое ранее смещение во времени. Более длительный период активности вулканизма и сейсмичности (4 года), по сравнению с солнечной активностью, объясняется, с одной стороны, достаточной инертностью геодинамических процессов, а с другой - влиянием, помимо солнечной активности, целого ряда других факторов, как эндогенного, так и космического характера.

Глава 3

СВЯЗЬ НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ГЛУБИННЫМИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

3.1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Изучение неприливных вариаций силы тяжести является важнейшим аспектом исследований современной геодинамики. Эта проблема также лежит в основе одного из наиболее перспективных направлений краткосрочного прогноза землетрясений.

Исследования неприливных вариаций силы тяжести были начаты в Институте Физики Земли АН СССР в 1935 году, причем основной причиной постановки данных работ стали довольно большие расхождения между повторными измерениями силы тяжести на Кавказе и в Средней Азии, достигающие десятков мГал (Абакелия, 1936). Учитывая высокую погрешность измерительной аппаратуры того времени, Н.Н. Парийский пришел к выводу, что такие расхождения преимущественно связаны с погрешностями приборов (Парийский, 1945, 1954).

Безусловно, любой полученный результат, свидетельствующий о существенных изменениях силы тяжести во времени, должен быть тщательно обоснован с точки зрения метрологического обеспечения измерений.

Барт во многих работах приводил теоретические обоснования возможных изменений силы тяжести глобального характера. Эти вариации обосновывались возможным перемещением ядра Земли относительно ее оболочек, что, по мнению ученого, должно было бы приводить к изменениям силы тяжести порядка 0,5 мГал/год. Впоследствии эти результаты не получили своего подтверждения. Между тем расчеты, выполненные Н.Н. Парийским, показали, что, если вариации силы тяжести связаны с процессами, оказывающими влияние на неравномерность вращения Земли, они могут достигать первых десятков мкГал/год (Pariisky, 1982). Влияние деформаций, происходящих внутри Земли, на изменения силы тяжести на ее поверхности, также теоретически рассчитывалось Вальшем и Райсом

в 1979 г., Таракановым и Шлейниковым в 1977 г., Bursha в 1972 г. и оно оказалось незначительным, в пределах до нескольких мкГал.

Смещение масс, вызываемое геодинамическими процессами, по расчетам Столза, произведенным в 1976 г., может привести к перемещению центра масс Земли на величину порядка 10 км, что должно привести к изменению силы тяжести на поверхности Земли на 2-3 мкГал/год.

Необходимо также учитывать влияние на показания силы тяжести перемещений воздушных масс в атмосфере, вызванных циклонами и антициклонами. Так, теоретические оценки влияния перемещений атмосферных масс как регионального, так и локального характера могут вызывать изменения силы тяжести порядка 15-20 мкГал (Двулит, Файтельсон, 1976).

Начиная с 1967 года А.Сакума в Севре стал систематически проводить определения абсолютных значений силы тяжести с помощью стационарного лазерного баллистического гравиметра. По его данным, с 1968 по 1973 г. сила тяжести в Севре увеличилась на 50 мкГал.

В 1976 году в СССР были начаты работы по определению абсолютных значений силы тяжести с помощью советского абсолютного гравиметра ГАБЛ. С 1976 по 1980 годы были проведены измерения в пунктах Ледово в Новосибирске, в Потсдаме, на пяти пунктах в Австралии, в Тасмании, Папуа-Новой Гвинее, Сингапуре, Финляндии. Полученные значения силы тяжести имели расхождение с данными, приведенными в каталоге IGSN-71, в среднем на + 35 мкГал. Ю.Д. Буланже не исключал возможности того, что изменения силы тяжести на одну и ту же величину на всех четырех пунктах вызваны какими-то глобальными причинами. В результате многолетних исследований он пришел к выводу, что «следует считать установленным фактом возможность локальных и региональных изменений силы тяжести порядка первых десятков мкГал/год (Буланже, 1984).

В работах Г.Т. Собакарь и В.И. Дейнеко (1978) рассмотрены корреляционные связи между квазипериодическими вариациями силы тяжести, солнечной активностью, энергией землетрясений и структурой земной коры. Предлагается использовать полученные результаты для тектоно-динамического районирования земной коры.

Многие исследователи отмечают непосредственную связь возникающих приливных вариаций силы тяжести с процессами подготовки сильных землетрясений. М. Тадзиму указывает на то, что короткопериодические изменения силы тяжести до 0,2-0,3 мГал происходят до и после землетрясений, вследствие одноосного горизонтального сжатия масс коры вблизи эпицентральной зоны, причем эти изменения могут продолжаться в течение 10 лет после землетрясения (Tadzi mu, 1970). В своих работах Р.Адамс отмечает, что перед и после Хайченского землетрясения в Китае с $M=7,3$ в 1975 году были зафиксированы изменения гравитационного поля до 350 мкГал. Несколько меньшие вариации гравитационного поля наблюдались в период катастрофического землетрясения в Тяньшане в 1976 г. (Adams, 1977).

При анализе записи наблюдений с помощью гравиметра Аскания за периоды, включающие сильнейшие землетрясения, Т. Кизава отмечал, что перед землетрясением на Аляске в 1964 году ($M=8,4$), примерно за 3 дня до землетрясения, появилась так называемая «вибрация записи» (относительно высокочастотные колебания показаний гравиметра), которая закончилась сразу после окончания землетрясения 28.03.1964 года.

На основе наблюдаемых неприливых вариаций перед сильными землетрясениями и был предложен способ прогнозирования землетрясений, зарегистрированный в качестве изобретения. Способ заключается в регистрации возрастания силы тяжести и последующего спада до среднего значения, с переходом в неизменную величину в течение 20 часов. Предполагается, что с этого момента можно ожидать сильного землетрясения (Амирханов, Сардаров, 1974).

Необходимо отметить относительный спад числа исследований неприливых вариаций силы тяжести в последнее десятилетие, что, по-видимому, связано с отсутствием ощутимых продвижений в данной области. Результаты исследований последнего десятилетия изложены в работах Ю.Н. Авсюка, Ю.В. Антонова, С.В. Слюсарева, В.Н. Чиркова, А.В. Манакова и ряда других исследователей. Наибольшее внимание в этих работах уделяется изучению вариаций вертикального градиента силы тяжести.

По мнению указанных авторов, длиннопериодные вариации вертикального градиента силы тяжести (более двух месяцев) связаны преимущественно с перемещением барицентра Земля-Луна по эклиптике. Вариации с периодом 10-60 дней определяются вращением Земли вокруг оси и влиянием Луны.

В то же время развитие науки и новых технологий внедряется и в данную область исследований. Так, в работе В.О. Михайлова и др. (2005) предложен принципиально новый подход к изучению вариаций силы тяжести. В частности, анализируется возможность применения данных спутниковых систем GRACE и GOCE о временных вариациях гравитационного поля Земли к изучению геодинамических процессов. В качестве примера рассмотрены процессы, происходящие в зонах субдукции.

Численными расчетами показано, что, если точность последующих моделей гравитационного поля Земли, доставляемых системой GRACE, повысится на один порядок, станет возможным выделение гравитационных эффектов, связанных с деформациями поверхности Земли над «запертыми» участками зон субдукции.

3.2. НЕПРИЛИВНЫЕ ВАРИАЦИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Изменения силы тяжести в зоне эпицентра готовящегося землетрясения, как указывалось выше, неоднократно наблюдались многими исследователями перед

сильными землетрясениями. Эти вариации силы тяжести вблизи очаговой зоны могут быть обусловлены целым рядом геофизических и тектонических причин:

- доходящее до критического уровня напряженное состояние очаговой зоны приводит либо к сжатию и, следовательно, уплотнению пород, либо к растяжению и снижению их плотности;
- критические напряжения в очаговой зоне готовящегося землетрясения приводят к активным движениям флюидов в пластах Земли, в результате чего в колодцах и скважинах наблюдается подъем либо спад уровня грунтовых вод перед землетрясениями;
- при достижении напряжениями критических величин начинается массовое трещинообразование в очаговой зоне и прилегающей к ней области, что вызывает нарушение сплошности пород и их разуплотнение;
- деформационные процессы, возникающие в очаговой зоне перед землетрясением, приводят к появлению участков повышенной и пониженной плотности.

Возможно, существуют и другие факторы, приводящие к изменениям силы тяжести, но все они имеют небольшой радиус действия вблизи очаговых зон готовящихся сильных землетрясений. Это связано с тем, что эффект изменения силы тяжести, связанный непосредственно с геодинамическими процессами в очаговой зоне, быстро уменьшается с расстоянием и может наблюдаться в радиусе от десятков до сотен километров от очаговой зоны.

Между тем на прогнозной станции «Binagadi» полигона НИИ прогнозирования и изучения землетрясений (г. Баку) на протяжении ряда лет устойчиво регистрируются изменения силы тяжести перед сильными землетрясениями, очаги которых находятся на расстоянии в десятки тысяч километров от станции регистрации.

Так, с 2002 года Научно-исследовательский институт прогнозирования и изучения землетрясений Международной Академии наук осуществляет непрерывное измерение неприливных вариаций силы тяжести на станции «Binagadi», размещенной на Апшеронском полуострове, в 25 км от г. Баку. Измерения осуществлялись одновременно четырьмя высокоточными кварцевыми гравиметрами типа KB и KC.

Гравиметры были выбраны таким образом, чтобы их показания были максимально сходны, т.е. цены деления и смещения «нуль-пункта» в абсолютных значениях характеризовались между собою малой разницей.

В результате измерений и интерпретации получаемых данных были выявлены гравитационные сигналы в вариациях силы тяжести, предшествующие сильным землетрясениям, эпицентры которых находятся на большом расстоянии (в радиусе от двух тысяч до десятков тысяч км) от регистрирующей станции. В процессе интерпретации результатов исследований вычитывались гравитационные эффекты от Лунных и Солнечных приливов. Как известно, солнечные приливы вызывают вариации силы тяжести, не превышающие 0,1 мГал, а амплитуда лунных вариаций составляет около 0,2 мГал.

Статистические данные показывают, что гравитационные сигналы были зарегистрированы в 90% случаев в среднем за 8-15 дней перед сильными землетрясениями.

Некоторые наиболее характерные результаты регистрации вариаций силы тяжести перед сильными землетрясениями за 2004-2006 годы показаны на приведенных ниже графиках. Анализ данных графиков показывает, что в большинстве случаев перед далекими сильными землетрясениями наблюдается сначала снижение, а затем увеличение силы тяжести. Между тем в некоторых случаях перед далекими сильными землетрясениями изменения аномалий силы тяжести имеют более сложный характер. В табл. 18 приведен каталог сильных землетрясений, произошедших в 2004-2006 годах, перед которыми на станции Binagadi были зарегистрированы аномальные изменения силы тяжести, и указаны их параметры.

32.1. Землетрясение на Тайване с M7 (15.10.2004)

15 октября 2004 г. у берегов Тайваня произошло сильное землетрясение. В эпицентре, который находился на дне океана, более чем в ста километрах к юго-востоку от столицы г. Тайбэй, сила толчков достигала 7 баллов по шкале Рихтера. По имеющейся информации, при землетрясении погибло около 3000 человек. На рис.65 показан график изменения силы тяжести перед землетрясением с M7 (№1), которое произошло в Тайване 15.10.2004 г. За восемь дней до основного толчка 08.10.04 начинается снижение значения силы тяжести, которое достигает минимальной величины за два дня до землетрясения - 13.10.04.

Затем наблюдается резкое увеличение силы тяжести на 1,4 мГал в течение трех суток, после чего происходит землетрясение.

Через 8 суток после землетрясения величина силы тяжести снижается и достигает первоначального фонового значения к 24.10.04. Таким образом, фактически зарегистрировано квазиволнообразное изменение во времени силы тяжести.

Полный период квазиволнообразной вариации Δg (KBB) составляет 15 су-

32.2. Катастрофическое землетрясение в Индонезии с M9 (26.12.2004)

Катастрофическое землетрясение 26 декабря 2004 г. с магнитудой 9 вблизи северной Суматры, возбудившее сильнейшее цунами (рис. 66), стало причиной гибели около 300 тысяч человек и вошло в историю человечества как одно из грандиознейших природных катастрофических событий. И дело не только в чудовищном числе жертв от землетрясения и произведенного им цунами. Речь идет

Таблица 18

Каталог сильных землетрясений, рассматриваемых в разделе 3.2

№	Name of district	Date and Time	Mag-nitude	Coordi-nates	Distance up to Baku Km/Mile
1	TAIWAN REGION	2004/10/15 04:08	7	24.53°; 122.694°	
2	Indonesia (tsunami)	26.12.04 0:58	8,8	3.316°; 95.854°	6169,3 Km; 3833,43 Mile
3	HALMAHERA, INDONESIA	2005/08/19 15:48	5,5	2.646°; 128.143°	
4	NEAR EAST COAST OF HONSHU	2005/08/24 10:15	6,2	38.564°; 142.987°	
5	EASTERN GULF OF ADEN, Indinesia	2005/08/26 18:16	6,2	14.417°; 52.365°	
6	OFF EAST COAST OF HONSHU, Japan	2005/08/30 18:10	5,7	38.495°; 143.151°	
7	Pakistan	08.10.05 3:50	7,7	34.43°; 73.54°	2182,33 Km; 1356,04 Mile
8	Pakistan	09.10.05 0:00	5,7	34.27°; 73.69°	2202,26 Km; 1368,42 Mile
9	BANDA SEA, Indonesia	27.01.2006 16:58	7,7	-5.45°; 128.1°	16116.44 Km; 10014.29 Mile
10	NORTHERN SUMATERA, INDONESIA	09.01.2005 22:12	6,1	4.926°; 95.108°	5980.88 Km; 3716.35 Mile
11	NICOBAR ISLANDS, INDIA	24.01.2005 4:16	6,3	7.33°; 92.482°	5588.20 Km; 3472.34 Mile
12	MINDANAO, PHILIPPINE ISLANDS	05.02.2005 12:23	7,1	5.293°; 123.337°	8221.74 Km; 5108.75 Mile
13	Southern Iran	13.03.2005 3:31	6	27.115°; 61.891°	1839.87 Km; 1143.24 Mile
14	NORTHERN SUMATERA, INDONESIA	28.03.2005 16:09	8,7	2.085°; 97.108°	6364.02 Km; 3954 Mile
15	JAVA, INDONESIA	27.05.2006 5:545	6,3	7.962°; 110.458°	
16	SOUTH OF JAVA, INDONESIA	17.07.2006 08:19	7,7	-9.222°; 107.320°	
17	HAWAII REGION, HAWAII	15.10. 2006г. 17:07	6,7	19.820°; 156.027°	12793.53Km 79495.53Mile
18	KURIL ISLANDS	11.15.2006г. 11:14	8.3	46.616°; 153.224°	7722.06 Km 4798.27 Mile

прежде всего об удивительном геологическом событии, масштабы которого столь велики, что оказали влияние на общепланетарные процессы на Земле.

Достаточно детально это событие описано в фундаментальной статье В.И. Старостенко и др. (2005). Катастрофическое землетрясение в Юго-Восточ-

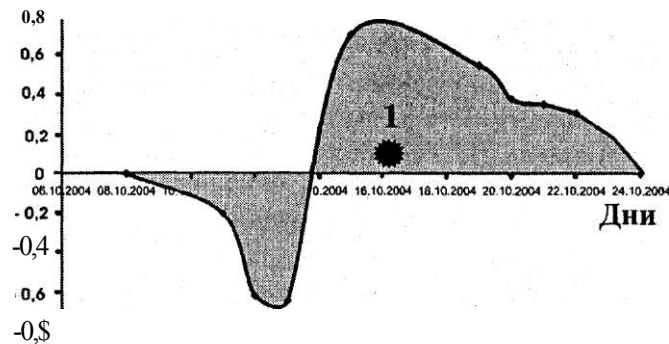


Рис. 65. Вариация силы тяжести перед сильным землетрясением в Тайване 15.10.2004 г.



Рис. 66. Схема распространения цунами от эпицентра катастрофического землетрясения в Индонезии 26 декабря 2004 г.

Изображение с сайта: www.wikipedia.org

ной Азии изменило геофизические характеристики Земли. Как сообщается на сайте Spaceflight Now, ученые из NASA установили, что подземные толчки повлияли на скорость вращения планеты, увеличили продолжительность суток и слегка изменили форму планеты. Кроме того, в результате землетрясения сместилось положение Северного географического полюса. Он сдвинулся на 2,5 сантиметра в направлении 145 градуса восточной долготы. Изменение скорости вращения планеты вызвало увеличение продолжительности суток на 2,68 микросекунды, а перемещение масс привело к изменению формы планеты. В результате землетрясения пропорции планеты изменились на одну десятиллиардную, то есть Земля стала менее сплюснутой и более компактной.

Катастрофическое землетрясение 26 декабря 2004 г. произошло в виде взброса на стыке Индо-Австралийской и Евразийской плит в районе северной Сумат-

ры. Примерно за 2 минуты разрыв реализовал упругую деформацию, которая накапливалась в данной очаговой зоне в течение столетий в результате продолжающейся субдукции (поддвига) Индо-Австралийской плиты под Евразийскую. Зона афтершоков 26 декабря имела протяженность около 1300 км. Если даже предположить, что только часть афтершоков отражала плоскость разрыва главного толчка, то, по мнению ряда исследователей, ее протяженность составляет значительно более 500 км. Как указано в работе Chen Ji (2005), геодезические наблюдения и компьютерное моделирование позволили прийти ученым к выводу, что максимальный подцвиг во время данного землетрясения на глубине 18 км составил примерно 20 м. При этом морское дно переместилось значительно меньше: в вертикальном направлении примерно на 5 м, а в горизонтальном - на 11 м. Именно с точки зрения общепланетарной масштабности данного события наиболее интересным, на наш взгляд, является исследование процесса геодинамической подготовки землетрясения, отраженного в глобальных изменениях силы тяжести.

Анализ записей изменений Δg до, во время и после Индонезийского землетрясения (№2) показал, что, в отличие от других сильных землетрясений, процесс подготовки, который проявился в виде квазиволнового полного цикла вариации силы тяжести, имеет значительно более длительный период (рис. 67). Так, снижение значения силы тяжести относительно средней величины начало проявляться 03 декабря 2004 г.

Начиная с 10 декабря наблюдается достаточно резкий подъем значений силы тяжести, при этом к 20 декабря сила тяжести увеличилась на 0,8 мГал, после чего к 21 декабря несколько снизилась на величину 0,1 мГал и оставалась неизменной вплоть до 24 декабря. 24 декабря значение силы тяжести опять начинает увеличиваться, достигнув своего максимума 26 декабря, подскочив на 0,15 мГал за 1 сут-

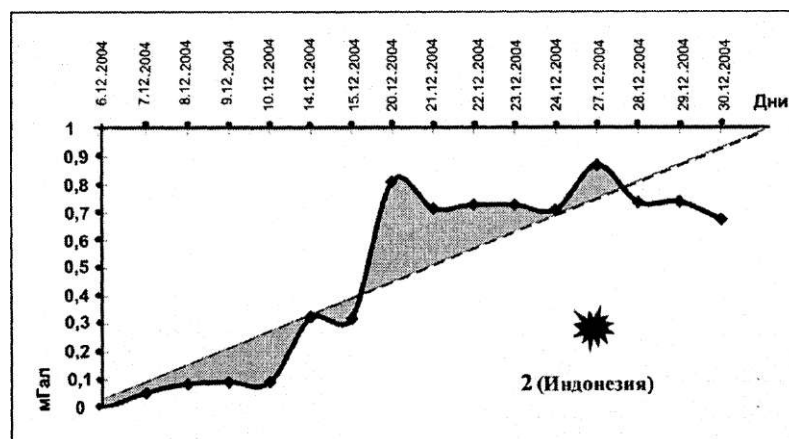


Рис. 67. Вариации силы тяжести перед сильным землетрясением, вызвавшим цунами в Индонезии 26.12.2004 г.

ки (см. рис. 67). После землетрясения значение Dg начинает медленно спадать, дойдя до среднего значения к 01 января 2005 г.

Таким образом, полный цикл КВВ составил при Индонезийском катастрофическом землетрясении 26 декабря 2004 г. около 28 суток. При этом начало этих изменений зафиксировано за 23 дня до основного толчка.

Этот период времени примерно втрое превышает средний период времени начала проявления гравитационного предвестника для других сильных землетрясений. Максимальная амплитуда КВВ составила 0,82 мГал. Этот факт еще раз подтверждает существенное отличие этого незаурядного геологического события в масштабе всей планеты от остальных сильных землетрясений, произошедших за последние 100 лет.

3.2.3. Серия землетрясений в Индонезии и Японии с М5,5-6,2 (с 19 по 30.08.2005)

Серия землетрясений, которые произошли в Индонезии и Японии в 2005 г., были не очень сильными. Но мы посчитали интересным рассмотреть процесс изменений Ag до, во время и после этих землетрясений, учитывая их яркую выраженность. 19.08.2005 произошло мало примечательное землетрясение в районе Индонезии (Halmahera) с М5,5 (№3), а 24.08.2005 в Японии (Honshu) произошло более ощутимое землетрясение с М6,2 (№4), затем в Индонезии происходит землетрясение 26.08.2005 г. также с магнитудой 6,2 (№5). Серия толчков завершается 30.08.2005 г. толчком в Японии (Off East Coast of Honshu) с М5,7 (№6) (рис. 68).

В целом существенный разброс в пределах огромной территории казалось бы никак не связанных между собой землетрясений средней силы свидетельствует

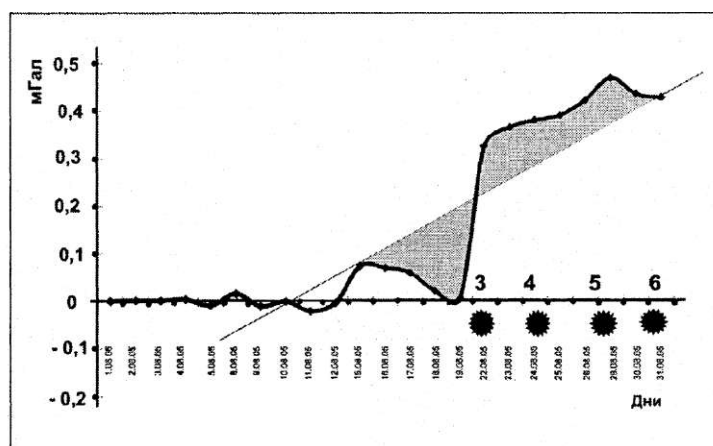


Рис. 68. Вариации силы тяжести перед сильными землетрясениями в Индонезии и Японии

о достаточно крупномасштабных глубинных геодинамических процессах, происходящих, по всей видимости, в мантии. Подтверждением этого является и ярко выраженное изменение во времени A_g .

Анализ вариаций A_g показал, что, начиная с 16.08.2005 г., значение силы тяжести снижается, дойдя до минимума 19.08.2005 г. Общая амплитуда снижения составила 0,1 мГал. С 21 по 24.08.2005 г. значение A_g постепенно растет, дойдя до максимума 29.08.2005, при этом максимальная амплитуда изменения силы тяжести составляет 0,46 мГал. Затем наблюдается спад величины A_g , которая достигает фонового значения 31.08.2005 г. Таким образом, полный период квазиволнового цикла вариации силы тяжести составил 15 дней.

3.2.4. Катастрофическое землетрясение в Пакистане M7,7 (08.10.2005)

Катастрофическое землетрясение, произошедшее 08 октября 2005 г. в Пакистане с магнитудой 7,7, отнесено специалистами к самым сильным и разрушительным землетрясениям в данном регионе за последние 100 лет. Первый толчок силой 7,7 балла произошел в 8.50 утра в субботу. По данным Геологической службы США (USGS), эпицентр землетрясения находился в 100 км северо-восточнее Исламабада - в пакистанском Кашмире (рис. 69), вблизи демаркационной линии, разделяющей Индию и Пакистан, на глубине 10 км. По данным USGS, в субботу и воскресенье в Пакистане было зафиксировано еще по меньшей мере 45 толчков, самый сильный из них - с эпицентром в 110 км к северу от Исламабада - достигал 6,3 балла по шкале Рихтера. Больше всего пострадали города Музаффарабад, Багх и Равала-Кот и прилегающие к ним территории. Серьезные разрушения наблюдались в районах Батаграм, Бала-Кот, Мансехра, Абботтабад и Патан. По имеющимся данным, это землетрясение унесло около 50 тысяч человеческих жизней в Пакистане. В Индии в наибольшей степени пострадали пограничные города Ури, Тангдар, Пунч и Сринагар. По данным индийских властей, погибло около 2000 человек.

Анализ изменений A_g до, во время и после Пакистанского землетрясения, показанных на рис. 70, также представляет большой интерес.

В отличие от значительно более масштабного землетрясения в Индонезии 26.12.04 г., землетрясению в Пакистане предшествовал относительно короткий период вариаций D_g . Снижение значений A_g относительно средних значений началось 02 октября, дойдя до минимума 04.08.05, после чего началось повышение значений D_g , которое к моменту землетрясения 08.10.05 (№7) поднялось на 0,73 мГал. Завершение цикла квазиволнового изменения силы тяжести пришлось на 09.10.2005 г. Период цикла составил 7 суток.



Рис. 69. Схема расположения эпицентральной зоны Пакистанского землетрясения
Точками показаны эпицентры землетрясений

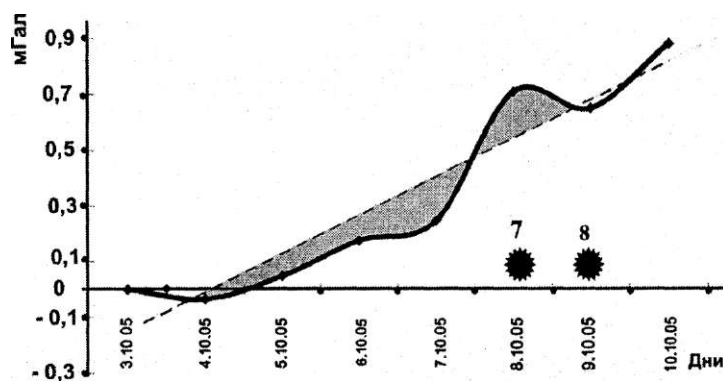


Рис. 70. Вариации силы тяжести перед сильным землетрясением в Пакистане 10.08.2005

Через день после основного толчка значение A_g снизилось на 0,1 мГал, и в этот момент произошел достаточно ощутимый афтершок с магнитудой 5,7 (№8), после которого значение A_g возросло на 0,2 мГал. Затем значение A_g начинает снижение, достигая среднего значения к 14.10.05 г.

3.2.5. Катастрофическое землетрясение в Индонезии M7,7 (27.01.2006)

27 января 2006 г. в регионе Индонезии произошло землетрясение с магнитудой 7,7 по шкале Рихтера (№9). Подземные толчки были зафиксированы в море Банда, к востоку от одного из крупнейших индонезийских островов Сулавеси. К счастью, данное событие не привело к серьезным последствиям и жертвам из-за существенной отдаленности эпицентра землетрясения от населенных пунктов. В то же время, с точки зрения энергетического проявления, это событие можно считать достаточно значительным. Об этом свидетельствует и характер изменений A_g перед землетрясением и после него.

На рис.71. приведен график изменения силы тяжести в процессе подготовки и после землетрясения в Индонезии от 27.01.2006 г. Процесс снижения значений силы тяжести начался 10.01.2006 г., дойдя до минимума 12.01.2006 г., после чего наблюдалось ее возрастание на 0,32 мГал с максимумом 25.01.2006 г.

С 26.01.2006 г. начинается снижение A_g которое возвращается близко к фоновому значению к 28.01.2006 г. Таким образом, полный период КВВ составляет 18 дней. Как видно, период цикла существенно выше среднего периода для сильных

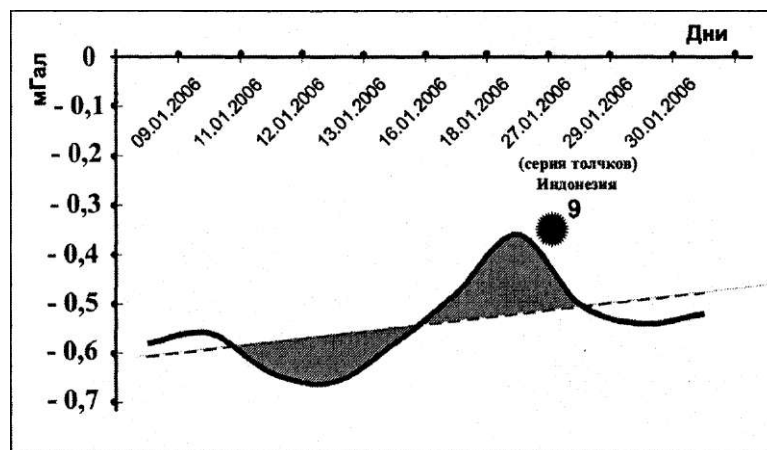


Рис. 71. Вариация силы тяжести перед сильным землетрясением в Индонезии M7,7 (27.01.2006)

землетрясений, но ниже, чем период КВВ при катастрофическом землетрясении в Индонезии 26.12.2004 г. Максимальная амплитуда изменения Dg составляет 0,32 мГал.

3.2.6. Землетрясения в Индонезии М6,1 и в Индии М6,3 (09.01.2005 и 24.01.2005)

Рассматриваемые землетрясения в Индонезии и Индии можно назвать рядовыми для данных регионов. Между тем, на наш взгляд, эти события представляют интерес с точки зрения интерпретации вариаций Ag , предшествующих этим землетрясениям и после них.

На приведенном на рис.72, графике весьма отчетливо наблюдаются две ярко выраженные аномалии во временных вариациях Ag . Рассмотрим первую аномалию. 06 января наблюдается начало снижения Ag , которая, снизившись на 0,2 мГал, достигает минимального значения между 06 и 07 января, после чего начинается возрастание значений силы тяжести, доходящее до максимума к 09 января, когда и происходит основной толчок в районе северной Суматры в Индонезии (№10), при этом разница от минимального до максимального значения Ag составляет 0,35 мГал. 12 января значение силы тяжести достигает фоновой величины, снизившись на 0,27 мГал. Таким образом, период квазиволнового цикла вариаций силы тяжести для Индонезийского землетрясения от 09.01.2006 составляет 6 дней, при этом период времени от начала снижения Ag до землетрясения составляет три дня.

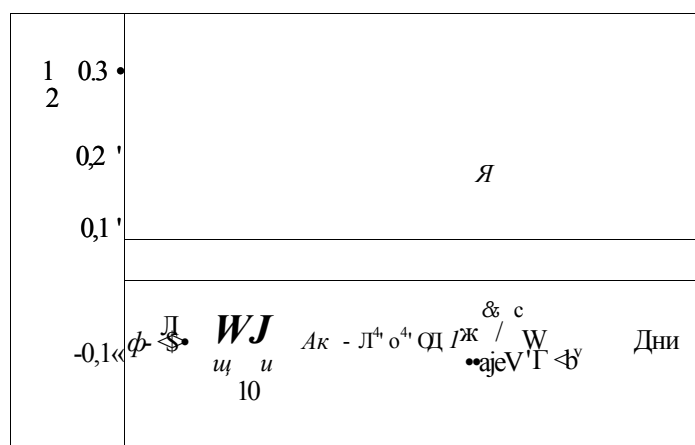


Рис. 72. Вариации силы тяжести перед сильными землетрясениями в Индонезии и Индии

Вторая аномалия вариаций силы тяжести соответствует землетрясению в Индии 24.01.2006 г. (№11) Начало снижения силы тяжести приходится на период между 17 и 18 января, при этом своего минимума Δg достигает 19 января, снизившись на 0,2 мГал. Затем начинается возрастание значений силы тяжести, которая достигает максимума 24.01.2006 г., при этом разница между минимальным и максимальным значениями составляет, как и в первом случае, 0,35 мГал. Последующее снижение до фонового значения на 0,27 мГал приходится на период между 26 и 27 января. Таким образом, период квазиволнового цикла вариаций Δg в период землетрясения в Индии составляет 7 дней. В результате интерпретации вариаций силы тяжести для землетрясений в Индонезии и Индии, имеющих, соответственно, магнитуды 6,1 и 6,3, были получены весьма интересные результаты. Для менее сильного Индонезийского землетрясения ($M_{6,1}$) период квазиволнового изменения Δg составляет 6 дней, а для более сильного Индийского землетрясения ($M_{6,3}$) - 7 дней. В то же время эти землетрясения имеют близкий порядок энергии, и амплитуда между минимальным и максимальным значениями для обоих событий одинакова и составляет 0,35 мГал, также как и амплитуда последующего снижения Δg до фонового значения, равная 0,27 мГал.

3.2.7. Землетрясение на Филиппинах $M_{7,1}$ (05.02.2005)

05.02.2005 г. на Филиппинах, в районе о. Минданао, произошло сильное землетрясение с магнитудой 7,1. Интерпретация графика неприливных вариаций силы тяжести до, во время и после данного события, приведенного на рис.73., представляется весьма интересной.

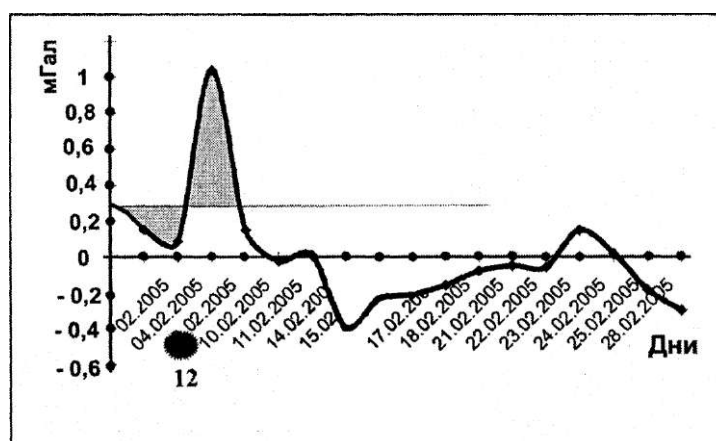


Рис. 73. Вариации силы тяжести перед сильным землетрясением на Филиппинах

Так, 31 января 2005 г. началось снижение значений A_g , достигнув минимума 03.02.2005. К 04.02.2005г. значение A_g возрастает на 0,96 мГал, после чего наблюдается резкое снижение силы тяжести на 1,2 мГал с минимумом 10.02.2005 г. Таким образом, полный период КВВ составил 10 дней.

Как видно из графика на рис.73, амплитуда вариации A_g была достаточно ощутимой (1,2 мГал), что свидетельствует о масштабности геодинамических процессов, сопутствующих данному землетрясению.

32.8. Землетрясения в Южном Иране М6 (13.03.2005) и в Индонезии М8,7 (28.03.2005)

Два неравноценных по своей энергетической значимости события достаточно отчетливо проявились в вариациях A_g , предшествующих и сопутствующих землетрясениям в Южном Иране (13.03.2005) с магнитудой 6 и Индонезии (28.03.2005) с магнитудой 8,7.

Не останавливаясь детально на описании Иранского землетрясения, подробнее рассмотрим события, произошедшие при сильнейшем землетрясении в Индонезии.

28 марта 2005 г. в Индийском океане около полуночи произошло землетрясение силой 8,7 балла по шкале Рихтера. Землетрясение ощущалось на расстоянии свыше 700 километров от эпицентра. Подземные толчки почувствовали жители Таиланда, Малайзии и Сингапура. Эпицентр землетрясения находился на дне океана, недалеко от индонезийского острова Суматра. Возникшее в результате землетрясения цунами высотой три метра, обрушилось на индонезийский остров Симелуэ, при этом пристань главного порта острова была частично разрушена, волна цунами достигла также аэропорта прибрежного города Синабанг. По оценкам властей Индонезии, число погибших в результате землетрясения, произошедшего 28 марта 2005г. у побережья Суматры, превышает 2 тыс. человек.

На рис.74 приведен график вариаций A_g , предшествующих и сопутствующих землетрясениям в Южном Иране (№13) и в Индонезии (№14).

Рассмотрим сначала Иранское землетрясение. 04 марта 2005 г. начинается снижение значений A_g , которые достигают своего минимума между 10 и 11 марта 2005 г, понизившись на 0,27 мГал. С 11 марта начинается возрастание D_g и 13 марта просходит землетрясение в Южном Иране с магнитудой 6, при этом значение силы тяжести продолжает увеличиваться, достигая максимума к 15 марта, причем максимальная амплитуда повышения D_g существенна и составляет 0,56 мГал. После этого наблюдается резкое снижение величины A_g на 0,62 мГал, с достижением минимума 16.03.2005 г. Полный период КВВ охватывает с 09 по 15 марта 2005 г. и составляет 6 суток.

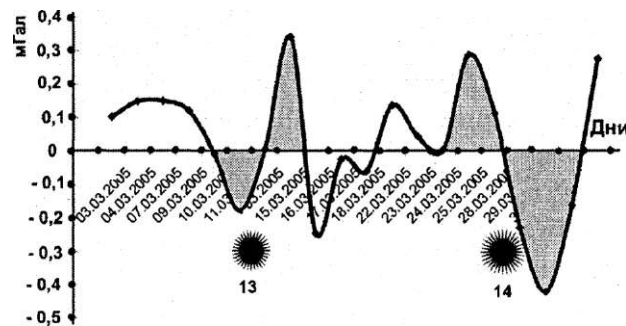


Рис. 74. Вариации силы тяжести перед сильным землетрясением в Южном Иране и Индонезии

В течение последующих пяти суток происходит повышение A_g на фоне флуктуаций. На наш взгляд, начало процесса подготовки Индонезийского землетрясения отражено на графике с 23 марта, когда A_g имеет фоновое значение. Между 24 и 25 марта A_g возрастает на 0,3 мГал, затем резко снижается на 0,72 мГал и, в процессе этого снижения, 28.03.2005 г. происходит сильнейшее землетрясение в Индонезии с магнитудой 8,7. При этом A_g достигает своего минимального значения между 29 и 30 марта 2005 г. Полный период КВВ охватывает с 23 по 31 марта 2005 г. и составляет 9 суток.

3.2.9. Землетрясение в Индонезии M6,3 (27.05.2006) и M7,7 (17.06.2006)

27 мая 2006 года в Индонезии, в районе города Джокьякарта, на о.Ява произошло сильное землетрясение, сила которого составила 6,3 балла по шкале Рихтера. Число погибших в результате землетрясения достигло 5115 человек. Ранения получили до 20 тысяч человек, без крова остались около 100 тысяч. После основного толчка последовали около сотни менее мощных. Практически весь регион остался без электричества и связи. В городе Бантул уничтожено около 80 % зданий. На рис. 75. приведен график вариаций A_g , на котором отчетливо наблюдается аномальное изменение силы тяжести во времени перед основным толчком (№15). Форма графика изменения A_g во времени имеет квазиволновой характер с полным периодом 12 дней. Максимальная амплитуда вариации (от максимума до минимума) составляет 0,45 мГал.

17 июля 2006 г. в Индонезии произошло очередное сильнейшее землетрясение с магнитудой 7,7. Его эпицентр находился на глубине 48 км в Индийском океане,

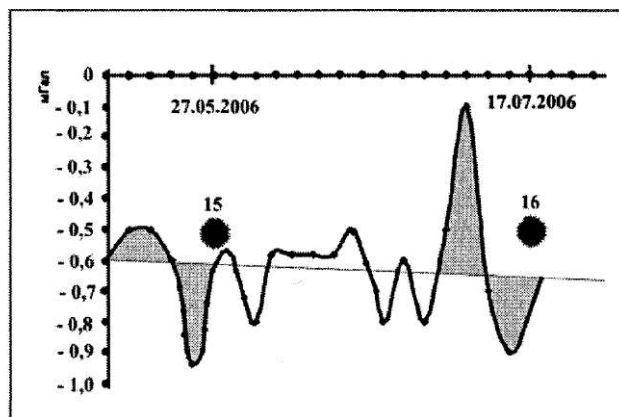


Рис. 75. Вариации силы тяжести перед сильным землетрясением

в 360 км от Джакарты. Затем последовали еще более 20 толчков. Землетрясение спровоцировало цунами высотой более 4-х метров, которое обрушилось на западное побережье индонезийского острова Ява. Основной удар стихии пришелся на курортный городок Пангандаран (провинция Западная Ява) и на район в 40 километрах к востоку порта Чилачап.



Фотография одного из авторов монографии Э.Н. Халилова на фоне разрушений во время сильного землетрясения в Джокьякарте

Примерно на трехсоткилометровом участке побережья Явы цунами разрушило и смыло в океан тысячи домов. Было нарушено энергоснабжение и телефонная связь. От землетрясения и цунами пострадал и город Джокьякарта. В результате землетрясения и цунами погибли около 1000 человек и еще 500 получили ранения.

На графике проявилась ярко выраженная аномалия вариации A_g , существенно превышающая аномалию при землетрясении 27.05.2006. На наш взгляд, это может быть объяснено значительно большей магнитудой землетрясения 17.07.2006 г. Форма аномалии A_g , предшествующей землетрясению, также имеет квазиволновой характер с периодом 13 дней. Максимальная амплитуда вариации A_g составляет 0,92 мГал.

На стр. 213 приведена фотография одного из авторов монографии рядом с разрушенными в г. Джокьякарта домами в результате сильных землетрясений и цунами, произошедших в Индонезии 27.05.2006 г. и 17.07.2006 г.

32.10. Землетрясения в Японии М_б (10.10.2006) и на Курилах М_{8,3} (15.11.2006)

10 октября 2006 г. в северной части Японии произошло землетрясение силой 6 баллов по шкале Рихтера. Эпицентр землетрясения находился в море вблизи города Фукусима, что в 240 км к северо-востоку от Токио. Землетрясение не вызвало больших разрушений, но его подготовка сопровождалась ярко выраженной аномалией вариации силы тяжести. Период квазиволновой вариации составляет 7 суток. Максимальная амплитуда изменений A_g составила 0,8 мГал.

15 ноября 2006 г. на Курилах произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой 8,3 по шкале Рихтера. Подземные толчки ощущались примерно в 390 км. восточнее острова Итуруп.

Землетрясению предшествовала аномальная вариация A_g имеющая квазиволновой характер с периодом 5 суток. Амплитуда вариации составляет 0,72 мГал (рис. 76).

3.3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Проведенные исследования непривливых вариаций силы тяжести позволили выявить квазиволновые вариации A_g , предшествующие и сопутствующие сильным землетрясениям. Примечательно, что амплитуда квазиволновых вариаций

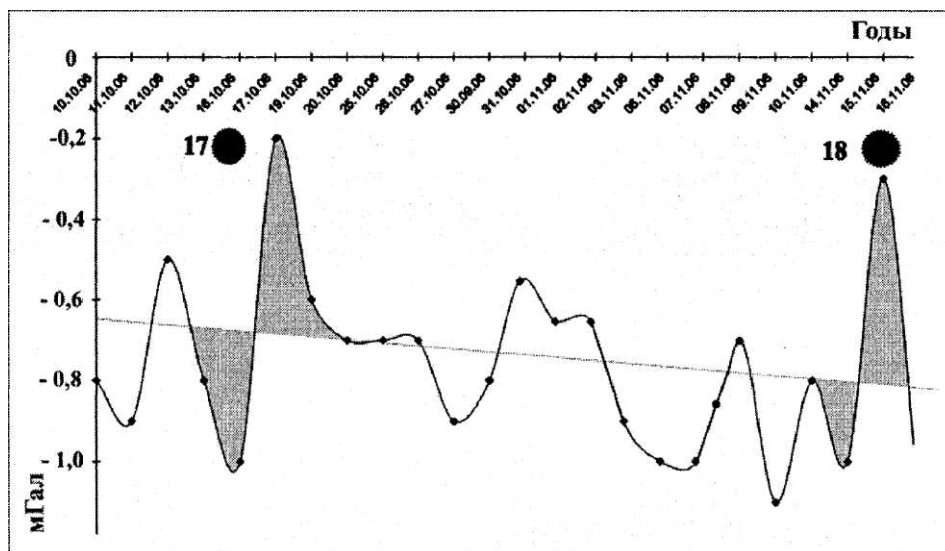


Рис. 76. График вариаций силы тяжести перед землетрясениями в Японии М6 (10.10.2006) и на Курилах М8,3 (15.11.2006)

А_g зачастую в несколько раз превышает лунно-солнечные вариации силы тяжести. Между тем, представляет интерес установление закономерностей между различными параметрами квазиволновых вариаций и сильных землетрясений. С этой целью нами были проведены исследования зависимости периодов КВВ от магнитуд землетрясений.

На графике (рис. 77) показан прямолинейный тренд, характеризующий зависимость периодов КВВ от магнитуды землетрясений. Как видно из графика, эти два параметра имеют прямо пропорциональную зависимость, т.е. чем выше период КВВ, тем выше магнитуда землетрясения.

Это может быть логично объяснено тем, что чем выше энергия землетрясения, тем больше времени требуется на процесс накопления и разрядки напряжений в недрах Земли.

Другим интересным аспектом, на наш взгляд, является возможность установить наличие зависимости между магнитудой землетрясения и амплитудой КВВ. На рис. 78. приведен график зависимости амплитуд КВВ от магнитуды землетрясений. Как видно из графика, эта зависимость также описывается прямолинейным трендом, свидетельствующим о том, что магнитуды землетрясений прямо пропорционально зависят от амплитуд КВВ, т.е. чем выше амплитуда проявления КВВ, тем выше энергия землетрясений. На наш взгляд, данный вывод также вполне логичен, ибо амплитуда КВВ может свидетельствовать о масштабе геодинамического процесса в недрах Земли.

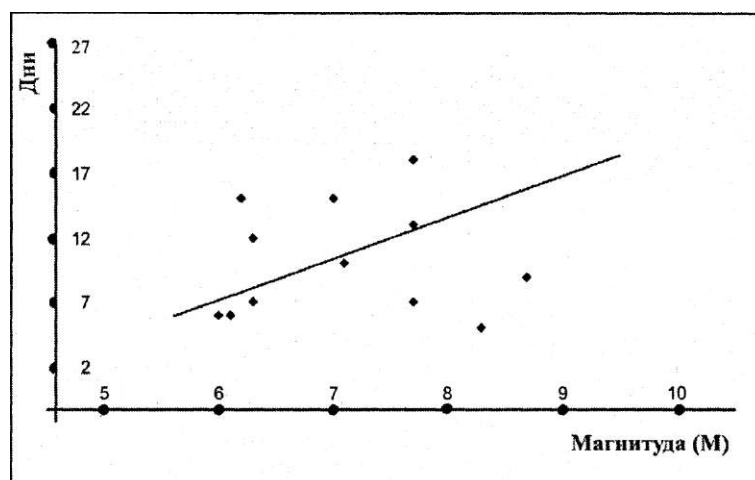


Рис. 77. График зависимости магнитуды от периода квазиволновой вариации A_g

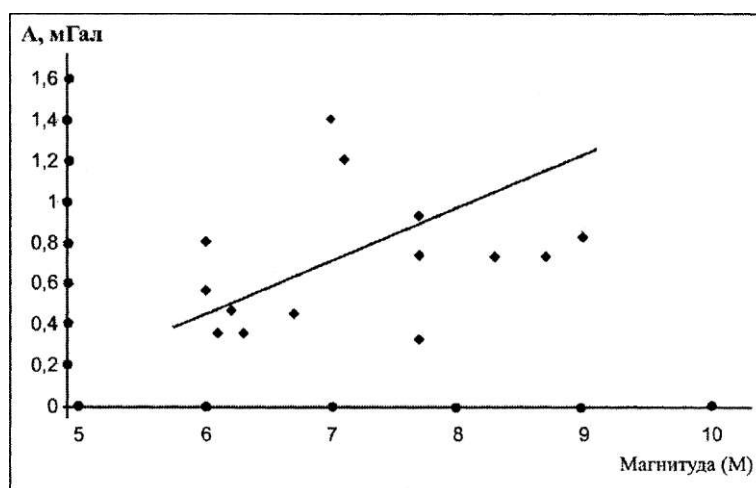


Рис. 78. График зависимости амплитуды квазиволновой вариации A_g от магнитуды землетрясения

Полученные результаты полностью изменяют сложившиеся представления о подходах к краткосрочному прогнозу землетрясений и о масштабах проявления предвестников сильных землетрясений на обширных территориях.

Исходя из полученных результатов, становится ясной причина многочисленных неудачных попыток прогноза землетрясений посредством регистрации изменений силы тяжести и, по всей видимости, ряда других предвестников. Исследователи, регистрирующие аномалии силы тяжести во времени, относили их

только к проявлениям подготовки близлежащих к регистрирующему прибору очаговых зон, тогда как на самом деле эти предвестники отражали подготовку землетрясений, очаги которых находились на больших расстояниях от станции наблюдения.

Наиболее красноречиво об этом заблуждении свидетельствует высказывание М. Тадзиму в 1970 г., который указывает на то, что короткопериодические изменения силы тяжести до 0,2-0,3 мГал происходят до и после землетрясений, вследствие одноосного горизонтального сжатия масс коры вблизи эпицентральной зоны.

В результате проведенных исследований нами сделан вывод о существовании двух типов предвестников сильных землетрясений:

- локальные предвестники, основной причиной которых являются тектонические процессы, локализованные в радиусе сотен километров от очаговой зоны готовящегося землетрясения;
- далекодействующие предвестники землетрясений, причиной которых являются крупномасштабные глубинные геодинамические процессы, происходящие в энергетически активных участках глубинных слоев Земли.

Примечательно, что на станции «Binagadi» были зарегистрированы вариации силы тяжести преимущественно перед удаленными землетрясениями в восточном полушарии. По-видимому, это связано с особенностями географического расположения регистрирующей станции по отношению к источнику КВВ.

Становится очевидным, что существование двух типов гравитационных предвестников землетрясений с одной стороны усложняет интерпретацию получаемых данных мониторинга вариаций силы тяжести, а с другой - позволяет исключить ошибки при краткосрочном прогнозировании землетрясений, когда далекодействующие гравитационные предвестники землетрясений воспринимаются в качестве локальных. Но самое важное - это то, что появилась возможность регистрировать момент зарождения будущей сейсмической активизации, связанный, по всей видимости, с проявлением геодинамической активности в глубинных слоях Земли.

3.4. ЯДРО ЗЕМЛИ - ОСНОВНОЙ ГЕНЕРАТОР СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Полученные нами результаты исследований, основанные на интерпретации данных по неприливному вариациям силы тяжести, зарегистрированным перед удаленными сильными землетрясениями на прогнозной станции Binagadi (Баку), привели к весьма интересным выводам, подтверждение которых принципиально изменяет представления о характере и физическом механизме проявления гравитационных предвестников землетрясений, с одной стороны, и приоткрывают за-

весу над механизмом начальной стадии сейсмической активизации в глубинных слоях Земли — с другой.

Для более глубокого осмысления полученных результатов необходимо рассмотреть существующие на сегодня модели глубинной структуры Земли и механизмы формирования и проявления геодинамической активности.

Одна из публикаций Б.В. Левина (2001) имеет весьма символичное, и, на наш взгляд, весьма близкое к истине название «Ядро Земли - дирижер сейсмической активности?». Возможно, мы приближаемся к тому времени, когда вопросительный знак после данного высказывания можно будет смело убрать.

По мнению Б.Л. Левина, основной источник внутренней энергии Земли, вызывающей повышение сейсмической активности, кроется в механизме воздействия приливных сил Луны и Солнца на внутреннее ядро Земли.

Несомненно, лунно-солнечные приливы оказывают определенное воздействие на процессы в ядре и других слоях Земли, но, на наш взгляд, они не являются преобладающими. В противном случае, многочисленные исследования в этой области позволили бы получить ярко выраженную корреляцию между сейсмической активностью и лунно-солнечными приливами. Приведенный же нами в данной монографии обзор работ многих исследователей в этом направлении показывает, что выявленные корреляции весьма неоднозначны и проявляются очень слабо.

Наука не стоит на месте, а ее прогрессу способствует в основном появление новых методов и инструментов исследований. На основе интерпретации сейсмограмм сильных землетрясений обнаружилось, что сейсмические волны распространяются через различные оболочки твердой Земли и ее ядро с различной скоростью, т.е. их вязкость, а, следовательно, и температура, изменяются не только по вертикальному разрезу (что, естественно, предполагалось и ранее), но и в латеральном направлении. Последнее же возможно в случае активного перемещения вещества. Иначе бы давно установились равновесие и однородность распределения вязкости и температуры в горизонтальном сечении.

Принципиально важным и новым было то, что эти наблюдения касались не только верхней мантии, но и нижней, лежащей на глубине более 660-670 км. Между тем еще сравнительно недавно интересы ученых ограничивались верхней мантией. Выдвинутый по инициативе В.В. Белоусова в 60-е годы международный проект так и назывался «Проект верхней мантии», а в 70-е его сменил проект «Литосфера», затрагивающий еще меньшие глубины.

Данные сейсмического «просвечивания» Земли, получившего название «сейсмотомография», показали, что активные процессы, приводящие, в конечном счете, к изменениям структуры земной коры и рельефа, зарождаются значительно глубже - в нижней мантии и даже на ее границе с ядром. Да и само ядро, как совсем недавно выяснилось, участвует в этих процессах, и к тому же его твердая составляющая - «внутреннее ядро» - вращается с большей скоростью, чем остальная планета. Появление сейсмотомографии определило переход геодина-

мики на следующий уровень, и в середине 80-х годов она породила глубинную геодинамику, ставшую самым молодым и перспективным направлением в науках о Земле. Уже первые результаты сейсмотомографических исследований показали, что современная кинематика литосферных плит вполне адекватно отражается лишь до глубин 300-400 км, а ниже картина перемещений мантийного вещества становится существенно иной (рис. 79). Это породило мнение о том, что тео-

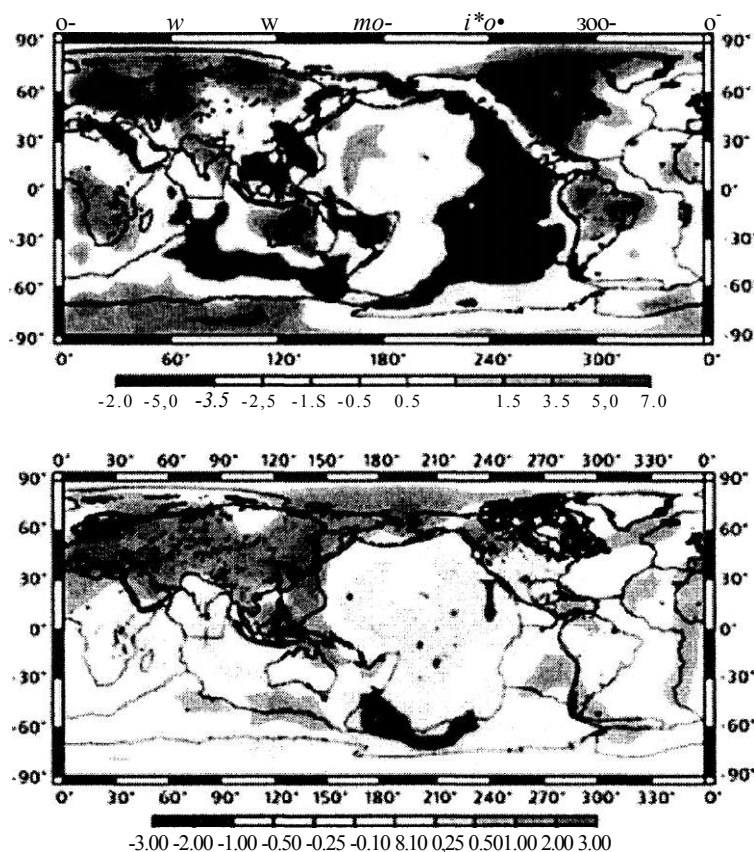


Рис. 79. Сейсмотомографические модели земных недр для глубин 100 и 310 км (Montagner, 2000)

Вверху: на глубине 100 км верхняя мантия разогрета под границами плит и в особенности под срединно-океанскими хребтами (мы наблюдаем низкие сейсмические скорости). Напротив, под континентами верхняя мантия холодная. Внизу: на глубине 310 км корреляция с поверхностной тектоникой отсутствует. Амплитуда аномалий ниже 300 км заметно уменьшается. В зонах субдукции сейсмические скорости повышены (в мантию погружаются холодные плиты). Только быстросрединговые хребты еще характеризуются медленными скоростями. Здесь и далее на рисунках оттенками более темного тона показаны повышенные (относительно средних, в %) скорости распространения сейсмических волн, а оттенками более светлого тона - пониженные скорости

рия тектоника литосферных плит не может претендовать на подлинно глобальное значение, и ее пора заменить новой концепцией. Хотя такие высказывания во многом справедливы, следует, тем не менее, отметить два важных положения. Во-первых, теория тектоники литосферных плит продолжает удовлетворительно объяснять развитие земной коры континентов и океанов на протяжении по крайней мере последних 3 млрд. лет. Во-вторых, для современной эпохи это подтвердили спутниковые измерения перемещения литосферных плит с помощью системы GPS (Global Positioning System). А в отношении позднего архея, отстоящего от нашего времени на 2.5-3.0 млрд. лет, убедительные данные были недавно получены в Северной Карелии экспедицией Геологического института РАН, обнаружившей разрез древней океанской коры - офиолитов, включающих такой характерный компонент, как комплекс параллельных даек. Аналогичное открытие недавно сделано и в Северном Китае.

К середине прошлого века в геофизике утвердилась модель оболочечного строения твердой Земли, предложенная австралийским ученым К. Булленом (модель Буллена-Джеффриса). В ней отдельные оболочки и ядро обозначены заглавными латинскими литерами: кора - А, верхняя мантия - В, переходный слой к нижней мантии - С, нижняя мантия - D (между 660-670 и 2900 км), внешнее ядро - Е, внутреннее - F. Довольно скоро, в 60-70-е годы, возникло подозрение, что в самых низах мантии существует слой с особыми свойствами: появились признаки нарушения монотонного возрастания скоростей сейсмических волн к границе ядра. Однако только в 80-е годы сейсмотомография получила достаточно убедительное подтверждение существования такого слоя, который получил обозначение D", или Д-дубль-прим (поскольку вышележащая нижняя мантия обозначалась индексом D', т.е. Д-прим).

Слой D" действительно оказался примечательным (рис. 80). Его верхняя граница с мантией неровная, и мощность меняется от 200 до 300 км. Эти значения в общем сопоставимы с мощностью переходного слоя от верхней к нижней мантии, залегающего на глубинах 410-660 км. Вязкость слоя D", судя по сейсмическим скоростям, также заметно варьирует в широтном направлении, указывая не только на температурные, но и химические различия в составе вещества. И, наконец, в подошве этого слоя выявлена зона ультранизких скоростей, что говорит о возможном частичном плавлении вещества. С открытием слоя D" у исследователей возникло вполне резонное предположение о его исключительно важной роли в глубинной и вообще глобальной геодинамике. Скорее всего, именно в нем находят свой «могильник» погружающиеся пластины океанской литосферы, так называемые слэбы (slab - ломоть по-английски) (рис. 81), а по соседству с ними зарождаются мощные восходящие струи разогретой и обогащенной легкими литофильными элементами мантии - мантийные плюмы (plume - перо, оперение по-английски). Прошло не так много времени, как стали появляться высказывания и о неоднородности нижней слоя D' мантии (Пущаровский, 2001). Вскоре сейсмотомография подтвердила - на глубине около 1700 км свойства мантии ис-

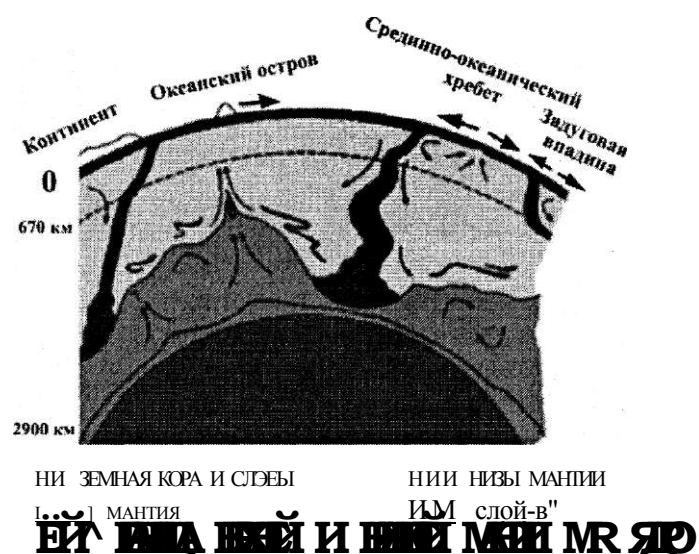


Рис. 80. Схема возможной динамики переходного слоя в нижней мантии

Глубина кровли слоя изменяется от ~1600 км почти до границы мантия-ядро, куда она смещается под действием погружающихся слэбов. Стрелками показано движение вещества. Циркуляция в слое происходит из-за внутреннего разогрева (Kellogg, 1999)

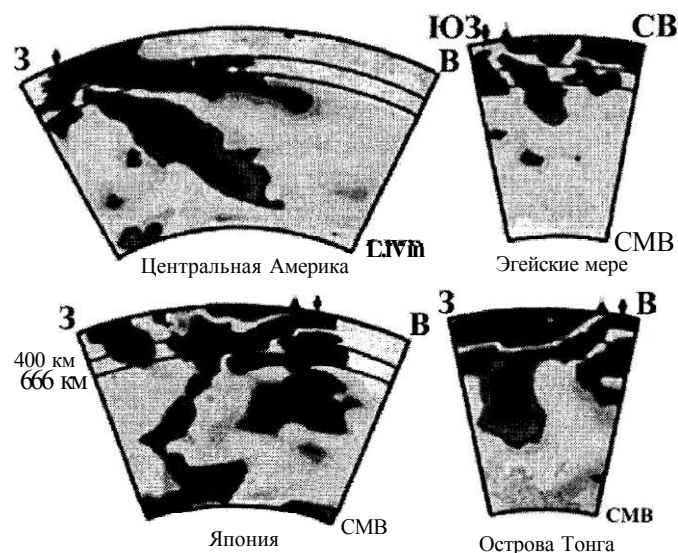


РИС. 81. Профили через различные зоны субдукции, показывающие вариации скоростей поперечных сейсмических волн (Hilst et al., 1997)

Стрелками показаны глубоководные желоба. СМВ - граница между мантией и ядром. По изменениям скоростей можно судить о поведении погружающихся слэбов

пытают определенные изменения, свидетельствующие о вариациях минерального и даже химического состава. Эти данные имеют большое принципиальное значение. Однако они пока не столь определены, чтобы уверенно проводить границу между верхней и нижней частями слоя D'.

И, наконец, уже в самое последнее время стало высказываться мнение о существовании непосредственно за верхней границей нижней мантии слоя с более низкой вязкостью, который тоже может играть значительную роль в распределении мантийных течений. Таким образом, в настоящее время вырисовывается следующая картина. В поперечном сечении земного шара существуют три наиболее активных слоя, каждый мощностью в несколько сотен километров: астеносфера, верхний слой нижней мантии и слой D" в основании мантии. По-видимому, им принадлежит ведущая роль в глобальной геодинамике (Kido, Yuen, 2000).

В споре, разгоревшемся в связи с появлением теории тектоники литосферных плит, ее противники довольно скоро вынуждены были признать реальность спрединга (по крайней мере в пределах современных срединно-океанских хребтов), но достаточно долго отрицали субдукцию. Они склонялись к гипотезе расширяющейся Земли в качестве альтернативы тектонике плит. Однако данные сейсмографии свидетельствуют о погружении глубоко в мантию наклонных зон повышенных сейсмических скоростей - пластин-слэбов океанской литосферы. Эти данные совпадают с давно установленными по гипоцентрам землетрясений сейсмофокальными поверхностями, достигающими кровли нижней мантии. Впервые было обнаружено, что в ряде случаев слэбы опускаются и на большие глубины, проникая в нижнюю мантию. Поведение погружающихся слэбов оказывается неоднозначным: одни из них, достигая нижней мантии, не пересекают ее, а отклоняются вдоль поверхности, принимая практически горизонтальное положение; другие пересекают кровлю нижней мантии, но затем образуют раздув и не погружаются глубже; третьи же уходят на большие глубины, в некоторых районах достигая ядра. Последнее было впервые обнаружено в начале 90-х годов на тихоокеанской плите Фараллон и произвело сенсацию в научных кругах. В дальнейшем оказалось все же, что большинство слэбов пересекают кровлю нижней мантии, не проникая в нее глубже 1000-1300 км, и дальше как-бы расплываются.

Интересный и важный результат сейсмографических исследований последних лет - обнаружение ископаемых зон субдукции, которые ранее, по геологическим данным, только предполагались. Такие зоны были выявлены под Монголо-Охотским подвижным и Охотско-Чукотским вулcano-плутоническим поясами, под Тибетом. Здесь, как и в случае плиты Фараллон, речь идет о слэбах, погружавшихся в мезозое и кайнозое (начиная со 180 млн. лет). Именно тогда плита Фараллон могла достигнуть поверхности ядра, уйдя глубоко под Северо-Американский континент (рис. 82) (что, кстати, раньше, по геологическим данным, также предполагалось). Другой, не менее важный, результат новейших сейсмографических исследований - открытие отрыва нижней части погружаю-

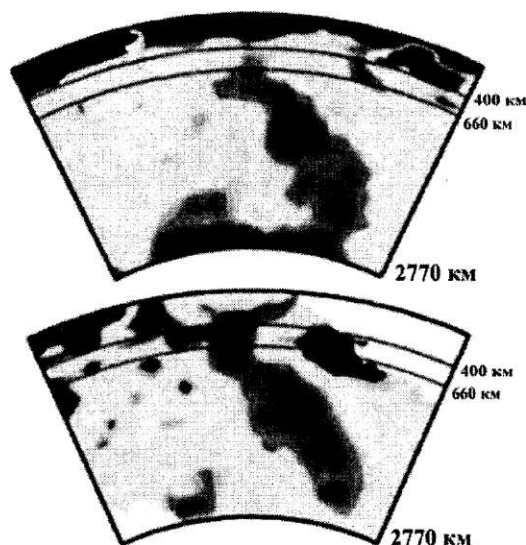


Рис. 82. Изменение скоростей продольных (вверху) и поперечных мантийных волн вдоль профиля через южную часть США (Hilst, Widiyantoro, 1977)

Широкая пластина аномалии, пересекающая всю нижнюю мантию, вероятно, отвечает плите Фараллон, которая погружалась в течение последних 100 млн. лет

щегося слэба. Это явление также не было полной неожиданностью. Сейсмологи констатировали в отдельных регионах исчезновение на некоторой глубине очагов землетрясений, а затем их возникновение вновь еще глубже. Одним из таких мест было море Альборан (рис. 83). И сейсмотомография действительно обнаружила там отрыв нижней части слэба, связанный с нарастанием растягивающих напряжений, возникновению которых способствуют дегидратация и дальнейшая метаморфизация (эклогитизация) базальтового и габбрового слоев. Подобный отрыв нижней части слэба представляет достаточно распространенное явление (как в недавнем, так и в более отдаленном геологическом прошлом) и имеет одно важное следствие: в зону отрыва снизу проникает материал астеносферы. Образуется астеносферное окно, дающее начало мантийному магматизму, который нередко следует за субдукционным и коллизионным. Причина возникновения мантийного магматизма ранее не находила удовлетворительного объяснения. Между тем с ним нередко связано значительное промышленное оруденение - например, платиноидное на Урале и золоторудное в Альпийском поясе Европы.

Говоря вообще о субдукции, нельзя не упомянуть еще об одной стороне, значение которой стало выясняться только недавно. В классической тектонике плит под субдукцией понималось погружение океанской коры и литосферы под островодужную или континентальную кору (в так называемых зонах Беньофа). Между тем сам этот термин был впервые предложен швейцарским геологом А. Амштут-

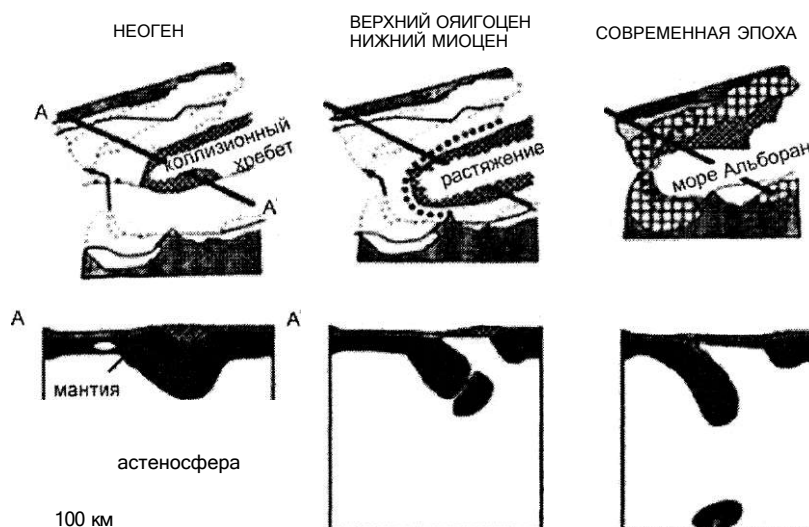


Рис. 83. Схемы отрыва нижней части погружающегося слэба Африканской литосферной плиты под морем Альборан (Blanco, Spukman, 1993)

Отрыв связан с нарастанием в нижней части слэба растягивающих напряжений, возникновению которых способствует дегидратация и дальнейшая метаморфизация базальтового и габбрового слоев

цем для погружения коры предгорного прогиба Альп под саму горную структуру. Впоследствии А.Балли предложил называть это субдукцией типа А, в отличие от классической субдукции типа Б (Беньофа).

Но субдукция А не привлекала особого внимания, так как считалось, что ее масштабы весьма ограничены в связи с повышенной плавучестью континентальной коры.

Однако сейсмопрофилирование методом отраженных волн, в частности, в Альпах и Карпатах показало, что континентальная кора платформ может уходить под смежные горы на расстояние более 100 км и погружаться на глубину более 150 км. А далее последовали совсем неожиданные открытия. В древних зонах субдукции обнаружили породы первично континентального происхождения, содержащие минералы, образующиеся в условиях сверхвысоких давлений - коэсит (высокобарическую модификацию кварца), алмазы и др. Последние могут говорить о погружении литосферы в зонах субдукции до переходной зоны от верхней к нижней мантии, а затем о ее выходе на поверхность. Возникла и оживленно дискутируется проблема образования пород ультравысоких давлений и их эксгумации (как стали называть этот процесс). Подобные породы обнаружены на Урале и в Центральном Казахстане. Предложен ряд моделей эксгумации, в общей форме предусматривающих заклинивание зоны субдукции, выжимание и всплывание континентальной части погружающейся литосферной плиты с отрывом ее

от океанского продолжения. На еще большую глубину, оказывается, способна погружаться океанская кора. В обломке эклогита из одной южноафриканской алмазоносной кимберлитовой трубки опять-таки найден коэсит.

Это рассматривается как свидетельство происхождения эклогита из субдуцированной океанской коры и участия последней в формировании литосферы. Одновременно подтверждается и гипотеза о роли субдукции в образовании алмазоносных кимберлитов, впервые выдвинутая российским ученым О.Г.Сорохтиным. Другая любопытная находка - характерный для нижней мантии минерал магнезиовустит, обнаруженный в алмазах. Предполагается, что он происходит из пограничной зоны верхней и нижней мантии.

Гипотеза восходящих мантийных струй, выступающих на поверхность в «горячих точках», выдвинута в 1963 г. Дж. Вилсоном и обоснована в 1972 г. В. Морганом. С ее помощью объясняется внутриплитный магматизм, и, в особенности, образование линейных вулканических цепей, в которых возраст построек закономерно увеличивается по мере удаления от современных активных вулканов. Эта плюм-тектоника с каждым годом все более популярна. Она стала если не альтернативой, то почти равноправным партнером плейт-тектоники (тектоники литосферных плит). Доказывается, в частности, что глобальный масштаб выноса глубинного тепла через «горячие точки» превосходит тепловыделение в зонах спрединга срединно-океанских хребтов.

Классический пример современной «горячей точки» - о-в Исландия, расположенный на пересечении оси спрединга Срединно-Атлантического хребта и зоны поперечных разломов. Действие плюма в Северной Атлантике началось на рубеже мела и палеогена, а в районе Исландии он сфокусировался в миоцене. Мощность коры океанского типа под этим островом достигает 40 км. Палеоаналоги Исландии - океанские плато, распространенные в Тихом и Индийском океанах: поднятия Шатского, Хесса, Онтонг-Джава, Кергелен и др. Область концентрации вулканических островов и подводных вулканов в центрально-западной части Тихого океана, выделенная в свое время Г. Менардом (поднятие Дарвина), после работы американского геофизика Р. Ларсона рассматривается как проявление гигантского суперплюма, «работавшего» в середине раннего мела. Л. Зоненшайн и М. Кузьмин обозначили этот регион в качестве «горячего пятна», а не отдельной точки, современную же проекцию суперплюма усматривают в юго-западной части океана, в Полинезии. Последнее подтверждается и данными сейсмотомографии. Второй подобный современный суперплюм, по тем же данным, существует под Восточной Африкой и смежной частью Индийского океана. Имеются серьезные основания предполагать, что корни суперплюмов достигают самых низов мантии. Не подлежат сомнениям реальность существования, а, следовательно, и значительная роль плюмов в развитии литосферы и магматизма, как внутриплитного, так и на дивергентных (расходящихся) границах плит (Исландия только один из примеров). Эта роль была, вероятно, особенно высока на ранних стадиях истории планеты.

Вместе с тем, возникает ряд проблем, пока не нашедших убедительного решения. К ним относятся: глубина заложения плюмов (иначе говоря, положение их корней в мантии); их локализация относительно границ литосферных плит и внутри последних; стационарность - абсолютная или относительная; длительность проявления. И главная проблема - соотношение конвекции, управляющей кинематикой литосферных плит, с адвекцией, вызывающей подъем плюмов. Они уже, в принципе, не могут быть независимыми процессами.

Прежде всего, нужно заметить, что с выявлением положения корней плюмов дело обстоит сложнее, чем с выявлением слэбов субдуцируемой литосферы, поскольку каналы, по которым поднимаются мантийные струи, более узкие. Примером возникающих трудностей может служить та же Исландия. Первоначально указывалось, что Исландский плюм имеет корни в нижней мантии, однако в недавней работе британских ученых категорически утверждается, что нет сейсмографических признаков его подъема из нижней мантии. Представляется наиболее вероятным выделение двух уровней зарождения плюмов: в низах мантии, слое D", и у границы верхней и нижней мантии (рис. 84). Первый - источник суперплюмов, второй - более второстепенных. Сначала допускали, что второй уровень располагается над границей 660 км, теперь высказывается мнение, что он может находиться под ней.

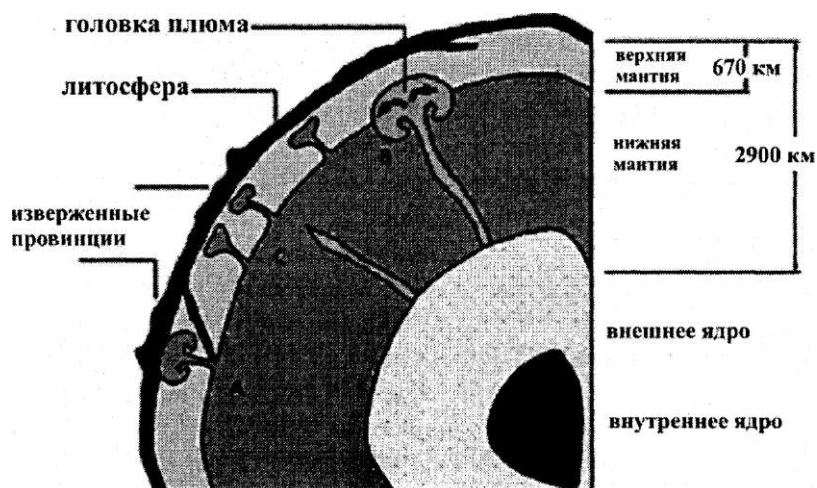


Рис. 84. Модели мантийных плюмов (Arndt N., 2000)

Плюмы ответственны за бурные вулканические процессы на поверхности Земли, которые формируют обширные изверженные провинции. Плюм А, поднимающийся от границы нижняя-верхняя мантия, образует головку после достижения литосферы. Широкая головка плюма В, поднимающегося с границы мантия-ядро, более холодная. Находка Р. Томпсоном и С. Гибсоном примитивных оливинов в вулканических породах, видимо, подтверждает первую модель, согласно которой головка плюма горячее ее хвоста. Модель С показывает, что плюм задерживается на границе нижней и верхней мантии и дает начало меньшим «плюмикам»

С только что рассмотренной проблемой связана еще одна: все ли фиксируемые на поверхности горячие точки - производные самостоятельных плюмов? На примере Восточной Африки сделано совершенно справедливое допущение, что крупные плюмы, достигая подошвы литосферы, могут расщепляться с накоплением расплава под участками утоненной рифтингом литосферы, или даже непосредственно внедряться в рифтовые зоны. Такое расщепление может, очевидно, происходить на границе верхней и нижней мантии, которая должна служить полупроницаемым барьером не только для субдуцируемых слэбов, но и для поднимающихся горячих струй.

Что касается закономерностей локализации плюмов, то их расположение во многих случаях совершенно очевидно. Одни, подобно Исландии, находятся на пересечении оси спрединга с крупными разломами, например, Азорский плюм в Атлантике, вулканические острова Сен-Поль и Амстердам на Юго-Восточном Индоокеанском хребте и др. Поднятие Шатского и ряд аналогичных океанских плато возникли на древнем тройном сочленении осей спрединга. Другие плюмы приурочены к внутриплитным, внутриконтинентальным рифтовым системам, тяготея опять-таки к их тройным сочленениям (например, район Афара в Восточной Африке) или пересечению крупными зонами разломов. Отсюда очевидно, что размещение «горячих точек» на поверхности контролируется ослабленными, проницаемыми зонами в коре и литосфере. Но корни этих плюмов ниже литосферы могут иметь и иное положение.

Очень важен вопрос о стационарности плюмов. Краеугольным камнем гипотезы Вилсона-Моргана было представление о фиксированном положении корней плюмов в подлитосферной мантии и о том, что образование вулканических цепей, с закономерным увеличением возраста построек, по мере удаления от современных центров извержений, обязано «прошиванию» движущихся над ними литосферных плит горячими мантийными струями. Это положение было использовано для определения абсолютных векторов относительного перемещения плит. Позднее стало допускаться отклонение верхушки плюма в направлении течения астеносферы.

Однако совершенно бесспорных примеров вулканических цепей гавайского типа не так уж много. Например, нет четкого увеличения возраста в весьма протяженной цепи о-вов Лайн в Тихом океане. Эти трудности обусловили возникновение альтернативных гипотез образования линейных вулканических цепей. Основная их идея заключается в том, что подобные структуры приурочены к зонам разломов, а их закономерное «старение» (далеко не везде проявленное) может объясняться течением астеносферы, зависящим от вращения Земли. К этим представлениям мы еще вернемся ниже.

Таким образом, в проблеме плюмов остается еще много неясного. А как они вписываются в общую картину мантийной конвекции?

С плюмами, расположенными на осях спрединга, все более или менее ясно: они отвечают участкам более интенсивного восходящего конвективного теп-

ломассопереноса, причем глубинные плюмы подпитывают верхнемантийную конвекцию. На основных плюмогенерирующих уровнях погружение субдуцируемых слэбов провоцирует подъем соседних плюмов, которые используют поступающий из слэбов материал. Такой сценарий, в частности, предполагается для слоя D". По идее А.Никишина, возникновение суперконтинента, опоясанного зонами субдукции, вызывает формирование под ним суперплюма. Последний, в конечном счете, стимулирует рифтинг и распад суперконтинента с образованием многочисленных «горячих точек». Этот процесс наглядно иллюстрирует пример отдельных разновозрастных сегментов Атлантики, в пределах которых континентальный рифтинг с роением даек и плато-базальтовыми полями закономерно предшествовал началу спрединга и образованию океана. В Центральной Атлантике это происходило в конце триаса-начале юры, в Южной Атлантике - в конце юры - начале мела, в Северной Атлантике - в самом конце мела и палеоцене.

В теории тектоники литосферных плит в качестве движущего механизма была привлечена мантийная конвекция. Однако прямых доказательств ее реального проявления не было до тех пор, пока сейсмическая томография не обнаружила в мантии чередование разогретых и охлажденных участков, устойчивое сохранение которых без конвекции невозможно. Но сама природа конвекции понималась, и все еще понимается, неодинаково: одни считают ее чисто тепловой (как в ранних версиях тектоники плит), другие (также достаточно давно) отстаивают ее термохимическую природу (Tackley, 2000). Тепловая составляющая, несомненно, играет если не исключительную, то ведущую роль, и это подтверждается успешным компьютерным моделированием кинематики плит (Трубицын, 1999). Но уже простые соображения показывают, что определенное значение имеет химический компонент. Ведь по химическому составу и погружающиеся слэбы океанской литосферы, и поднимающиеся мантийные струи плюмов отличаются от окружающей мантии. А данные сейсмотомографии указывают на такие различия и в физических свойствах мантийного вещества, которые только температурными условиями объяснить нельзя. Поэтому и некоторые зарубежные исследователи склоняются к представлению о термохимической конвекции, наиболее последовательно в настоящее время развиваемому у нас Л.И.Лобковским в Институте океанологии РАН (Лобковский, Котелкин, 2000).

Еще большие разногласия существуют по вопросу о мантийной конвекции - общая она или проявляется раздельно в верхней и нижней мантии (выше или ниже 660 км). Здесь наиболее объективный показатель - поведение субдуцируемых слэбов. А они, как отмечалось выше, ведут себя по-разному: одни задерживаются выше указанного раздела, другие его пересекают и образуют под ним скопление субдуцируемого материала (вероятно, для того, чтобы потом обрушиться, подобно лавине, ниже), третьи достигают низов мантии. Все это свидетельствует о том, что раздел 660 км играет роль полупроницаемого барьера для конвективных течений. Таким образом, возможны и общемантийная, и двухъярусная конвекция. Отсюда и успешное моделирование той и другой, в частности, двухъ-

ярусной, Н.Л. Добрецовым и А.Г. Кирдяшкиным в Новосибирске (Добрецов, Кирдяшкин, 1994). Дело в том, что вероятность той или иной формы конвекции зависит, в основном, от вязкости мантии, а последняя - от температуры. В раннем докембрии, особенно в архее, мантия была горячее современной. В то время могла преобладать двухъярусная конвекция, а с охлаждением Земли она должна была смениться общемантийной, господство которой мы в настоящее время, видимо, и наблюдаем. Однако, скорее всего, процесс носил более сложный характер. Образование суперконтинентов стимулировало переход к общемантийной конвекции, а их распад - к двухъярусной. Так они чередовались во времени, не заслоняя, однако, полностью общей тенденции.

Исторически сложилось, что в этом споре геофизики (в своем большинстве) оказались сторонниками общемантийной конвекции, а геохимики - двухъярусной. Позиция геохимиков объясняется тем, что состав продуктов магматизма, в особенности океанских островов, требует существования в глубинах мантии резервуара, отвечающего примитивной мантии, сохранившей свой состав со времени аккреции планеты. Первоначально допускалось, что вся нижняя мантия может быть таким резервуаром, но это представление не выдержало томографической проверки. Однако ныне геофизики предполагают, что такой «заповедник» - самая нижняя часть мантии, ниже 1300 и даже 1700 км. Дальнейшие исследования должны подтвердить или опровергнуть это предположение.

В классической мобилистской гипотезе А. Вегенера в качестве движущей силы дрейфа материков рассматривалось осевое вращение Земли, а дефицит этой силы был одной из причин отторжения данной гипотезы геофизиками. В классической же тектонике плит фактор вращения Земли вообще не принимался в расчет. В дальнейшем на его возможную роль, пусть и второстепенную, стали обращать внимание, а в последние годы появился ряд серьезных работ, рассматривающих его влияние на кинематику плит.

Одним из основных аргументов служит заметная диссимметрия окраин Тихого океана: на западе развита система окраинных морей и островных дуг, которые подстилаются крутонаклоненными зонами субдукции, на востоке окраинные моря и островные дуги отсутствуют, а зоны субдукции преимущественно полого наклонены. Сторонники влияния ротационного фактора (силы Кориолиса) объясняют это тем, что течение в астеносфере с запада на восток, вызываемое вращением Земли, в первом случае ориентировано навстречу субдукции, а во втором - в том же направлении. Следует, однако, заметить, во-первых, что подобная картина строения окраин Тихого океана сложилась лишь примерно 35 млн. лет назад, а до этого она была противоположной.

Во-вторых, американские континенты надвигаются на Тихоокеанскую впадину в связи с раскрытием Атлантики и отходят от оси спрединга Срединно-Атлантического хребта. Тем не менее, независимые наблюдения у берегов Центральной и Южной Америки подтверждают существование здесь направленного к востоку течения в астеносфере.

Наиболее разработанная модель кинематики литосферных плит, с учетом ротационного фактора, предложена А.Д. Смитом и Ч. Льюисом (Smith, Lewis, 1999). Ее суть представлена на схеме (рис. 85). Надо добавить, что ротационный фактор привлечен этими исследователями и для объяснения образования линейных вулканических цепей в Тихом океане. В общем, представляется, что в подлинно глобальной и полной геодинамической модели учет ротационного фактора обязателен.

Специалисты в области наук о твердой Земле, в отличие от метеорологов и гидрологов, далеко не всегда осознают, что наша планета представляет открытую систему, существующую не в абстрактном, а в конкретном космическом пространстве и взаимодействующую с ним. Пожалуй, признается лишь импактный эффект от столкновения с астероидами и кометами. Между тем, виды взаимо-

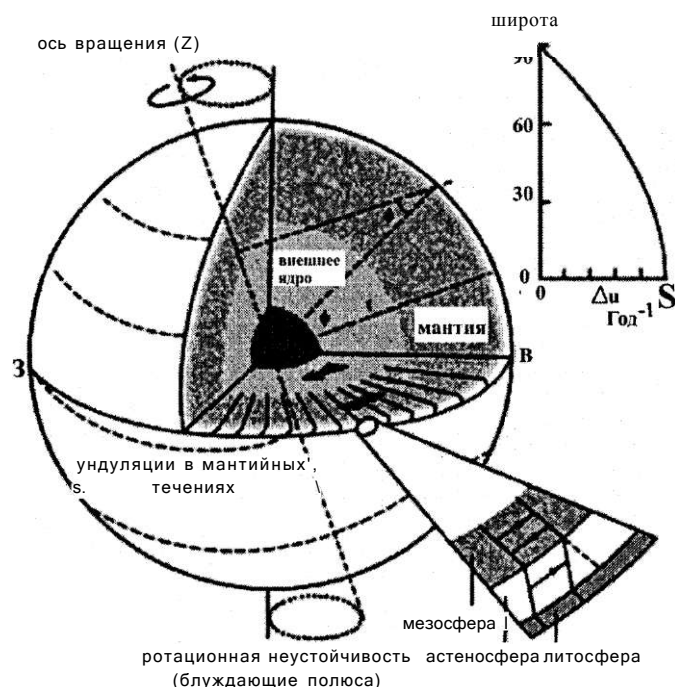


Рис. 85. Модель вращения оболочек Земли вокруг центральной оси

Передача напряжений через астеносферу (с пониженной вязкостью) в сочетании с действием на подошве плит порождает отставание литосферных плит относительно мезосферы (зоны между астеносферой и нижней мантией) в западном направлении. Это отставание обуславливает дифференциальное вращение мантии и литосферы, которое может рассматриваться как течение мантии в восточном направлении. Значение достигает 5 см год⁻¹, уменьшаясь к полюсам. Волновые изгибы мантийного течения возникают вследствие смещения оси вращения (блуждания полюсов) в ответ на смещение масс на поверхности Земли (по К. Доглиони)

действия Земля-Космос достаточно разнообразны и, вероятно, немаловажны. Один из них - взаимодействие в системе Земля-Луна. Эта система фактически представляет двойную планету, барицентр которой лежит вне Земли, а уменьшение амплитуды вызываемых притяжением Луны твердых приливов и замедление вращения Земли носят, вероятно, не монотонный колебательный характер, а могут находиться в резонансе с тектонической цикличностью (Авсюк, 1999). Р. Востром считает, что проявление на Земле субдукции, и вообще тектоники плит, практически не известной на других планетах земной группы, было обусловлено именно взаимодействием Земли и Луны (Bostrom, 2000).

Достаточно давно было обращено внимание на совпадение длительности крупномасштабных тектонических циклов, установленных еще в самом конце XIX в. французским геологом М.Бертраном, со временем обращения Земли и всей Солнечной системы по галактической орбите. На этом пути Земля пересекает струйные потоки газопылевого галактического вещества, которое может оказывать определенное воздействие на происходящие в ее недрах процессы. Иными словами, речь идет об определенном резонансе между космическими и глубинными геодинамическими процессами. И эта проблема заслуживает самого пристального внимания.

Недавно французские исследователи М. Греф-Лефтц и И. Легро (Greflf-Lefftz, Legros, 1999) показали, что осцилляции в жидком ядре и лунно-солнечные приливы могли оказываться в резонансе $3.0 \cdot 10^9$, $1.8 \cdot 10^9$ и $3 \cdot 10^8$ лет назад и вызвать дополнительный разогрев ядра, дестабилизацию слоя D" и генерацию глубинных плюмов, что привело к усилению образования континентальной коры, плато-базальтовому вулканизму и резкому изменению частоты инверсий геомагнитного поля.

Зарегистрированные в НИИ прогнозирования и изучения землетрясений вариации силы тяжести перед сильными землетрясениями, эпицентры которых находятся на удалении в 4-7 тысяч километров от регистрирующей станции, могут пролить свет на пространственно-временной характер процесса зарождения глубинной геодинамической активности. Главный вопрос, при интерпретации вариаций гравитационного поля Земли перед сильными удаленными землетрясениями, заключается в том, связаны ли эти аномалии непосредственно с подготовкой очаговой зоны землетрясения или отражают зону зарождения геодинамической активности в глубинных слоях мантии.

Проведенные нами расчеты показывают, что, если бы источником гравитационных аномалий, зарегистрированных перед сильными землетрясениями в Пакистане, Индонезии и других, удаленных от станции «Binagadi» на 4-7 тысяч километров, землетрясений, были бы их очаговые зоны, то в них должны были бы образовываться неправдоподобно гигантские области повышенной плотности, образующие аномальную массу диаметром в тысячи километров. В этом случае вблизи самих очаговых зон были бы зарегистрированы гравитационные аномалии в сотни миллигал, что в действительности не наблюдается. Следовательно, не

исключено, что источник вариаций во времени гравитационного поля находится в недрах Земли на большой глубине и удален от очаговой зоны землетрясения так же, как и от регистрирующей станции.

Опираясь на вышеописанные новейшие данные сейсмотомографии и сформированную, в определенной степени, обновленную модель глубинной геодинамики Земли, можно предположить следующий механизм проявления дальнедействующих гравитационных предвестников сильных землетрясений. В глубинных слоях Земли, предположительно в слое D", с определенной квазиволновой циклическостью, возникает некий энергетический выплеск, носящий относительно кратковременный характер (рис. 86). Этот выплеск энергии должен спровоцировать образование области повышенного давления, температуры и пониженной плотности, подпитывающей плюм, которая создает дополнительный импульс в конвективных течениях в мантии. Этот импульс, через определенное время, приводит к ускорению конвективных потоков в астеносфере, что вызывает активизацию движений литосферных плит, в зависимости от того, в какой части слоя D" происходит выплеск энергии. Безусловно, от момента энергетического импульса в слое D" до начала сейсмической активизации на границах литосферных плит проходит определенное время.

Именно этот промежуток времени, в среднем, 8-20 дней, по всей видимости, проходит от начального момента регистрации вариаций силы тяжести перед сильными землетрясениями. И в этом случае могут быть две причины возникновения зарегистрированных аномалий силы тяжести: 1) образование в слое D"

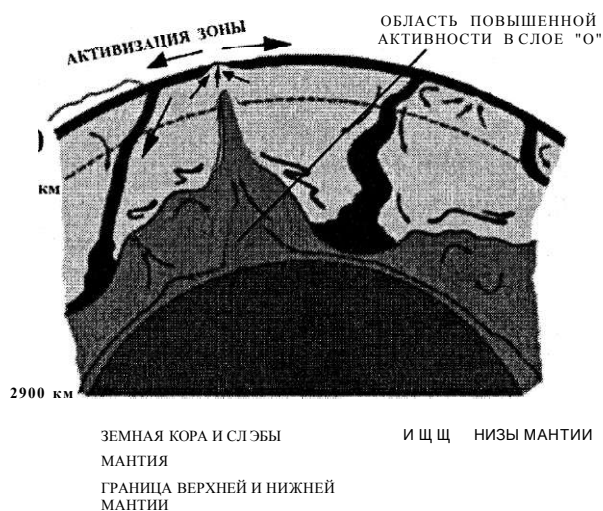


Рис. 86. Модель начального момента выплеска энергии и образования области повышенного давления и температуры и пониженной плотности, подпитывающей плюм

гигантских областей аномальной плотности и, как следствие, аномальной массы, вызванных энергетическим выплеском; 2) излучение тектонических волн в зоне энергетического выплеска в слое D".

Природа тектонических волн иная, чем сейсмических, и они отражают не только попеременное чередование и движение от источника излучения областей сжатия-растяжения (повышенной и пониженной плотности), но и частичное перемещение вещества мантии.

Может существовать еще один геодинамический механизм, вызывающий наблюдаемые вариации силы тяжести перед сильными удаленными землетрясениями - излучение тектонических волн непосредственно самим, готовящимся к разрядке, очагом землетрясения. Эта концепция нами рассматривается в последующих разделах.

В настоящее время мы не готовы однозначно остановиться на одном из механизмов возникновения вариаций силы тяжести перед и в процессе проявления удаленных от регистрирующей станции сильных землетрясений. С физической точки зрения наблюдаемые аномалии более правдоподобно могут быть объяснены именно регистрацией сверхдлинных тектонических волн, излучаемых в слое D и попеременно изменяющих плотность пород по мере своего движения, что, в свою очередь, регистрируется гравиметрами в виде вариаций силы тяжести. Тектонические волны также могут вызывать резкое повышение напряжений в очаговых зонах, где их величина достигла критических величин, приводя к землетрясениям.

Глава 4

О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЦИКЛИЧНОСТЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

4.1. ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ И ВОЗМОЖНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ЕЕ ВАРИАЦИЙ

Несмотря на выдающиеся успехи последних десятилетий в области фундаментальной физики и астрофизики, вопросы гравитации по-прежнему волнуют умы ученых всего мира. Одна из самых фундаментальных и всеобъемлющих физических констант - гравитационная постоянная G - так и не может быть измерена с высокой достоверностью вплоть до сегодняшнего дня, являясь яблоком раздора для целого ряда различных научных центров и отдельных исследователей.

Впервые вопрос гравитации наиболее полно и глубоко был изучен Исааком Ньютоном (1643-1727 гг.), который в 1687 году опубликовал знаменитый научный труд «Математические начала натуральной философии». В этой работе впервые были выдвинуты и достаточно детально рассмотрены теория движения планет и основы гравитации. В соответствии с законом Всемирного тяготения И. Ньютона, каждые две частицы материи тяготеют друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = Gm_1m_2/r^2, \quad (4.1)$$

где F - сила притяжения между частицами материи; G - гравитационная постоянная; m_1 и m_2 - массы притягивающихся частиц материи, r - расстояние между ними.

Между тем, установленный Ньютоном закон не сразу был понят и оценен его современниками. Например, Христиан Гюйгенс писал: «Мысль Ньютона о взаимном притяжении, я считаю нелепой и удивляюсь, как человек, подобный Ньютону, мог сделать столь трудные вычисления и исследования, не имеющие в основе ничего лучшего, чем эта мысль» (Рябов, 1988).

Необходимо отметить, что мысль о том, что небесные тела обладают свойством притягивать, высказывали до Ньютона Николай Кузанский, Леонардо да Винчи, Коперник и Кеплер (Маженов, 2000). Так, Кеплер в своей книге «Новая астрономия» писал: «Тяжесть есть взаимная склонность между родственными телами, стремящимися слиться, соединиться воедино.... В какое место мы ни поместили бы Землю, тяжелые тела вследствие природной им способности будут всегда двигаться к ней... Если бы в каком-нибудь месте Мира находились два камня на близком расстоянии друг от друга и вне сферы действия какого бы ни было родственного им тела, то эти камни стремились бы соединиться друг с другом подобно двум магнитам...»

До И. Ньютона идею всемирного тяготения выдвинул Роберт Гук (1635-1703), при этом между ними начался серьезный спор о приоритете на открытие. Однако, в отличие от Р. Гука, Ньютон разработал математическую основу теории тяготения и доказал численными методами действие закона тяготения.

После смерти Ньютона одним из самых серьезных возражений против закона всемирного тяготения считается публикация французского математика и астронома Алексиса-Клода Клеро в 1745 г. В частности, проведенные им вычисления орбиты Луны, по его мнению, требовали исправления закона всемирного тяготения.

Самостоятельный путь исследований А. Клеро движения лунного перигея привел его к тому же значению, к которому пришел в свое время Ньютон, и которое расходилось с наблюдаемыми данными почти в два раза. К этим же выводам, независимо, пришел и другой известный ученый - Жан Лерон Даламбер (1717-1783).

Практически одновременно А. Клеро и Ж. Даламбер пришли к выводу, что теория Ньютона не объясняет движение перигея Луны и требует внесения поправок.

Против выводов А. Клеро и Ж. Даламбера высказался известный французский естествоиспытатель Жорж Бюффон (1701-1783). Будучи признанным авторитетом, он оградил от дальнейших нападок закон всемирного тяготения Ньютона, заявив: «нам предлагают нечто произвольное, вместо того, чтобы воспроизводить истину.... Всякий физический закон лишь потому является законом, что его выражение обладает единственностью и простотой».

Несмотря на то, что почти сразу после опубликования Ньютоном закона всемирного тяготения многими физиками стали вводиться к нему различные поправки, практическое использование получил только закон А. Холла, согласно которому:

$$F = G m_1 m_2 / r^{2+\delta}, \quad (4.2)$$

где $\delta = 1,574 \cdot 10^{-7}$.

Введенная А.Холлом поправка δ позволяет закону (4.1) описать реальное движение большой полуоси Меркурия, отличающееся от расчетного по закону на 43 за сто лет. Этот закон (4.2) использован С. Ньюкомом также для вычисления эфемерид Венеры, Земли и Марса (Успенский, 1997, 2000).

Меркурий, на фоне других планет, имеет орбиту со значительным эксцентриситетом $e=0,2066$, что определяет существенные изменения расстояния r до Солнца в процессе орбитального движения. Поэтому, естественно, что введена поправка именно к расстоянию r , и она указывает, как изменяется сила F на фоне закона (4.1) при взаимодействии двух небесных тел - Солнца и Меркурия, с присутствующими им геометрическими и массовыми характеристиками, при существенном изменении r или при изменении геометрических условий взаимодействия.

Следующим шагом, подтвердившим закон всемирного тяготения Ньютона, явился гениальный по простоте и точности опыт Генри Кавендиша.

Один из самых точных экспериментов по определению гравитационной постоянной G , выполнил английский физик Генри Кавендиш, результаты своего опыта опубликовал в 1798 году. Он измерял силу тяготения между двумя неподвижными свинцовыми шарами и двумя малыми шарами, расположенными на концах коромысла, висящего на очень тонкой нити. Измеряя, насколько закрутится нить в результате притяжения малых шаров к большим, Г. Кавендиш вычислил силу притяжения между шарами и убедился, что она обратно пропорциональна расстоянию между ними. Таким образом, был точно определен коэффициент G по формуле (4.1). Измеренный коэффициент G оказался равным $6,670 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$. На рис. 87. показано изображение крутильных весов Г. Кавендиша.

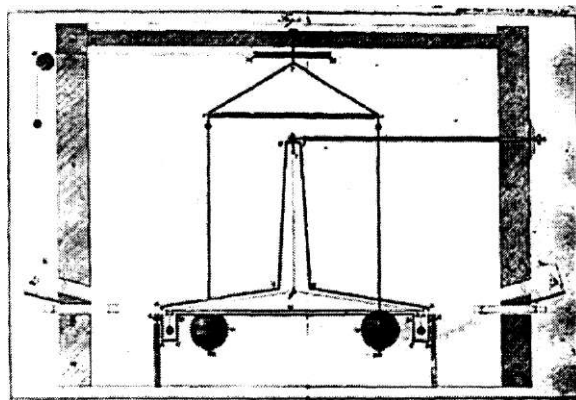


Рис. 87. Торсионные весы, на которых Генри Кавендиш в 1797 г. впервые измерил гравитационную постоянную G

Кавендишевская лаборатория была основана в 1869 году, но годом ее формального открытия считается 1874 год.

Несмотря на то, что после этого удивительного опыта Г.Кавендиша прошло уже более 200 лет, гравитационная постоянная по-прежнему считается одной из наименее точно измеренных фундаментальных констант.

Основная проблема заключается в том, что, несмотря на постоянное повышение точности измерительных приборов, полученные разными исследователями в разных странах и в разное время значения G между собой существенно отличаются, и эти отличия значительно превышают погрешность приборов, с помощью которых измерялась величина G .

Принцип современных приборов для измерения гравитационной постоянной со времен Кавендиша практически не изменился. Это те же торсионные весы, с той лишь разницей, что в них используются современные материалы и технологии, в частности, прецизионные измерители отклонений коромысла с грузиками, вакуумные установки, позволяющие получать в измерительной камере глубокий вакуум, и датчики, контролирующие температурный режим и различные электромагнитные характеристики среды и отдельных узлов.

К числу последних достижений в области измерительных технологий можно отнести современные торсионные весы Gundlachs, на которых ученые Вашингтонского университета уточняют значения гравитационной постоянной (рис. 88)

Установка Gundlachs мало чем отличается от крутильных весов Кавендиша (<http://www.aip.org/ptysnews/graphics/html/newgrav.html>). В ней измеряется сила притяжения между двумя подвешенными внутри пластинами (на фотографии не видны) и несколькими шарами, расположенными по периферии цилиндра и вра-

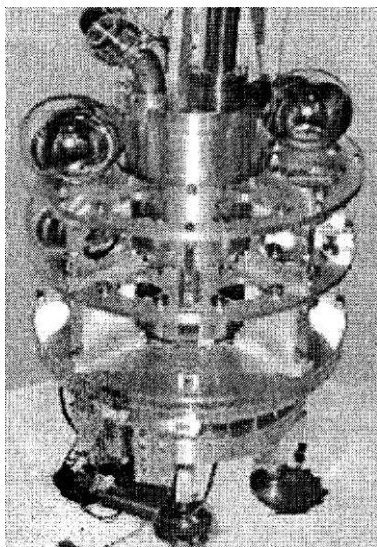


Рис. 88. Современные торсионные весы, используемые в Вашингтонском университете

щающимися вокруг него. Погрешность измерения удалось значительно снизить, используя механизм обратной связи: помещаемые рядом с крутильными весами шары перемещались так, чтобы свести скручивание нити маятника к минимуму. Размер установки в поперечнике более полуметра.

Используя данную установку, группе исследователей из Университета Вашингтона в Сиэтле, во главе с Jens Gundlach и Stephen Merkowitz, удалось улучшить точность определения G на два порядка. Они опубликовали результат измерения $G = 6,67390 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$, с погрешностью 0,0014%.

Учитывая это новое значение G при анализе измерений спутника Legos, который промерял параметры своей орбиты лазером с точностью до 1 мм, удалось вычислить новое, более точное значение массы Земли: $(5,97223 \pm 0,00008) \cdot 10^{24}$ кг. Аналогично, более точное значение массы Солнца равно $(1,98843 \pm 0,00003) \cdot 10^{30}$ кг.

По последним данным (CODATA-1999), в качестве международного стандарта G принято числовое значение

$$G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ Н м}^2/\text{кг}^2. \quad (4.3)$$

Ниже приводится таблица 19 фактически измеренных значений G за последние 30 лет (Халилов, 2004).

Как видно из приведенной таблицы, измеренные в последние 30 лет значения G существенно разнятся, несмотря на совершенствование измерительных технологий.

Безусловно, такие отклонения в измеренных значениях G вызывают серьезные проблемы при космологических расчетах, в частности, при расчетах параметров планет, траекторий их движения и т.д.

Так, в табл. 20 приводится сравнение значений G и масс Солнца и Земли, вычисленных до 2000 года и в 2002 году, по данным НАСА и сайтов ASTROPHYSICAL CONSTANTS (http://www.rol.ru/new/misc/spacenew/02/09/27_007.htm274).

Таблица 19

Значения гравитационной постоянной, полученные в разные годы в разных странах

Страна	Год	Значение G , $10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$
Франция	1972	$6,6714 \pm 0,0006$
СССР	1977	$6,6745 \pm 0,0008$
США	1982	$6,6726 \pm 0,0005$
СССР	1983	6,6720
Россия	1993	$6,67369 \pm 0,00020$
Россия	1996	$6,67263 \pm 0,00013$
CODATA	1998	6,67259
CODATA	1999	6,673 (10)
Astrophysical Constants	2000	6,673 (10)
США	2002	$6,67390 \pm 0,0014$
Швейцария	2002	$6,67404 \pm 0,000033$

Таблица 20

Значения гравитационной постоянной в разные годы и вычисленных на их основе масс Солнца и Земли

Источник информации	Год	Значение G (Н·м ² /кг ²)	Масса Солнца (кг)	Масса Земли (кг)
ASTR. CONST	до 2000	6,67259 (85)	$1.98892(25) \cdot 10^{30}$	$5.97370(76) \cdot 10^{24}$
ASTR. CONST	после 2000	6,673 (10)	$1.9889(30) \cdot 10^{30}$	$5.974(9) \cdot 10^{24}$
NASA	2002	6,67390	$1.989100 \cdot 10^{30}$	$5.9736 \cdot 10^{24}$

Как видно из табл. 20, существует разброс значений G и вычисленных на их основе масс Солнца и Земли.

Невозможность однозначного определения G приводит к ощутимому разбросу различных космологических характеристик, увеличивающемуся пропорционально масштабам рассчитываемых величин.

В последние десятилетия в метрологии наблюдается переход на атомные эталоны времени: (частоты), длины, напряжения и т.д., в основе которых лежат процессы микрофизики. В связи с этим также встает вопрос о переходе на атомную систему единиц, связанную с фундаментальными физическими величинами (<http://www.minigrail.nl/main.html>).

В работах Н. Зайдель (1970), R. Morgastern (1971) рассматривается учет влияния различных эффектов, связанных с движением и кривизной, на временные изменения G в различных моделях скалярно-тензорных теорий. Отмечается, что влияние скалярного поля существенно в начальной стадии расширения Вселенной и при коллапсе массивных тел. В настоящее время существует множество вариантов скалярно-тензорных теорий <http://www.geo600.uni-hannover.de/>, которые дают разные зависимости гравитационной связи от скалярного поля, хотя зависимость от времени приблизительно соответствует теории Бранса-Дикке (Morgastern, 1971).

Г. Гамов (Gamov, 1967) предложил рассматривать отношение гравитационных сил к электромагнитным. Это отношение приблизительно равно G^1 . Гамов предположил, что это происходит не за счет изменения G, а за счет векового изменения элементарного заряда $e^r \sim t$.

Е. Теллер (Teller, 1948), Л.Д. Ландау (1958), К.П. Станюкович (1965), Де Витт (De Witt, 1964), А. Салам и Д. Страсди (Salam, Strathdee, 1970) выдвинули различные аргументы, приводящие к соотношению между гравитацией и электромагнетизмом. Теллер выдвинул свою гипотезу в связи с трудностями с экспериментальным обоснованием гипотезы Дирака. Л.Д. Ландау исходил из анализа трудностей квантовой теории поля (наличие расхождений). К.П. Станюкович, Де Витт, А. Салам и др. пришли к такому соотношению при попытке использовать гравитацию для преодоления расхождений в квантовой теории поля.

К.П. Станюкович разработал теорию гравитации с переменной гравитационной связью. Он исходил из групповых соображений и законов сохранения. Все уравнения теоретической физики инвариантны относительно масштабных преобразований кроме уравнений Эйнштейна. В своих работах К.П. Станюкович установил связь между «квантовыми» и космологическими константами.

В то же время Д. Кавалло (Cavallo, 1973) предложил еще одно объяснение соотношения Дирака. Он предположил, что Вселенная обладает моментом импульса, пропорциональным моменту импульса электрона. В рамках расширяющейся ньютоновской космологической модели с вращением им были получены соотношения, аналогичные дираковским.

С развитием высоких технологий не прекращаются попытки повышения точности измерений G . Так, А. Сандерс и У. Дидс (Sanders, Deeds, 1981) предложили метод измерения G на уровне 10^{-6} , основанный на наблюдении за движением двух тел разной массы внутри свободного от сноса спутника Земли, с использованием траекторий типа подковы: более легкое тело («частица»), находясь на несколько более низкой орбите, чем тяжелое тело («пастух»), нагоняет его, затем за счет взаимодействия с ним переходит на более высокую орбиту и начинает отставать от него в орбитальном движении. В цилиндрической капсуле (диаметром ~ 1 м и длиной 20 м), защищающей тела от торможения в атмосфере, давления излучений, электрических и магнитных полей, тела взаимодействуют в течение 1-4 сут., (Гейзенберг, 1968).

Космический метод, в отличие от лабораторных, позволяет избавиться от не поддающегося точному расчету влияния окружающих тел и создает условия, при которых на частицу не действуют внешние силы, намного превосходящие силу ее взаимодействия с «пастухом»: приливные силы в поле Земли практически одного порядка с ней (Гейзенберг, 1968).

Между тем для данного метода не найдено ни одного аналитического решения, описывающего используемые траектории, даже в предельно идеализированной постановке задачи.

Предварительная оценка показывает, что при слежении за траекторией частицы массы t , с погрешностями определения координат $\sim 10^{-6}$ см, постоянная G определяется с погрешностью $\Delta G/G$ не более 10^{-6} . По мнению В. Гейзенберга (1968), в следующем порядке величины, который также представляется достижимым по данным оценкам, появляются трудно учитываемые факторы. В частности, существенное ограничение на точность эксперимента накладывает ошибка слежения за спутником, приводящая к неточному знанию приливных сил. Ряд авторов (де Саббата и др., 1992; Мельников, Радынов, 1990) считают, что использование тел массой t , изготовленных из различных материалов, дает также возможность на несколько порядков улучшить современные оценки возможного нарушения принципа эквивалентности и констант неньютоновских взаимодействий.

По мере повышения точности измерений значений G , странным образом увеличиваются различия между ними. Так, до настоящего времени два наиболее точных измерения G были получены группами ученых в Вашингтонском Университете в Сиэтле и Международном бюро мер и весов под Парижем, причем в обоих случаях ошибки эксперимента составляли $1/10000$, однако разница полученных значений превышает возможные погрешности в 10 раз.

Жан-Поль Мбелек (Jean-Paul Mbelek) и Марк Лашьез-Рай (Marc Lachieze-Ray) из французской комиссии по атомной энергии заявили, что им удалось понять причину подобного расхождения между экспериментальными значениями. Для этого им пришлось принять во внимание географическое положение лабораторий, в которых эти эксперименты проводились. Исследователи предположили, что в основе наблюдавшихся расхождений лежит взаимовлияние гравитационного и электромагнитного полей.

В своей работе, направленной в журнал *Classical and Quantum Gravity* и представленной на совещании Европейского астрономического союза в г. Порто (Португалия), они привели вычисления ожидаемых значений гравитационной постоянной в разных регионах планеты. В основу расчетов были положены теории, предполагающие наличие скрытых размерностей у пространства (в частности, теория струн, в рамках которой объединяется электромагнитное и гравитационное поля).

Из расчетов получается, что земное тяготение будет сильнее в тех местах, где сильнее магнитное поле, т.е. максимальных значений можно ожидать в районах северного и южного магнитных полюсов. По их мнению, имеющиеся экспериментальные данные вполне согласуются с теорией, однако требуется проведение прецизионных измерений, как в районах самих полюсов, так и в экваториальных районах.

Ученые считают, что исследования Солнца также подтверждают их предположения. Если использовать модель, в которой применяется меньшее значение гравитационной постоянной, то получается лучшее согласование с экспериментальными данными (Mbelek, Lachieze-Rey, 2002). Мбелек сообщил, что, согласно их расчетам, при высоких температурах, влияние магнитного поля на силу притяжения ослабевает. Таким образом, по их мнению, можно ожидать, что константа G внутри Солнца имеет меньшее значение.

Между тем многие ученые не разделяют вышеуказанные концепции. Новый эксперимент группы швейцарских физиков из Университета Цюриха позволил получить результат, отличающийся от французского. Так, в специальном цементированном подвале около Виллигена (Швейцария), они с помощью чувствительных лабораторных весов измерили различия в массе двух маленьких гирь, над или под которыми были размещены две гигантские емкости ртути весом 13 тонн. Измеряя сверхчувствительными весами изменения веса пробных масс, исследователи вычислили значение G . (Nolting et al., 2000). Их результат

- $6,67404 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$ - согласуется с результатом, полученным группой в Сиэтле, и отличается от результата, полученного французскими учеными.

Стефан Шламингер (Stephan Schlamminger), руководитель цюрихской группы, считает, что этим самым парижский результат опровергнут. Напротив, Мбелек заявляет, что магнитное поле в Сиэтле воздействует на G точно так же, как и в местности, где проводился эксперимент швейцарцев, что подтверждает концепцию Мбелека.

Во всяком случае, попытки уточнить измеренные значения G пока что приводят к усилению отклонений в данных, полученных различными учеными Мира. Это усугубляет некоторую растерянность ученых, так как вариации G ставят под сомнение основные положения общей теории относительности Эйнштейна.

4.2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ

Приведенные в предыдущем разделе факты о существенных вариациях измеренной гравитационной постоянной, безусловно, наталкивают многих исследователей на мысль о возможности изменений G во времени.

Как уже отмечалось выше, первым, кто серьезно усомнился в неизменности гравитационной постоянной, был П. Дирак (1979).

К 1930 году космология претерпевала революционные изменения. Многие исследователи склонялись к мнению, что статические космологические модели Эйнштейна и де Ситтера не соответствуют наблюдательным данным, полученным Хабблом и другими, свидетельствующим о расширении Вселенной. Теория расширяющейся Вселенной была замечена и принята Эддингтоном только после перевода в 1930 году статьи Леметра.

К 1930-1934 гг. концепция расширяющейся Вселенной стремительно развивалась, занимая серьезное место в космологии.

Теория Дирака была построена на идее расширяющейся Вселенной и включала в себя концепцию Леметра о происхождении Вселенной в далеком прошлом. Философия теории Дирака основывалась на теориях его прежних учителей Эддингтона и Милна. Впервые П. Дирак опубликовал свою космологическую идею в небольшой статье в журнале «Nature» в феврале 1937 г.

К примеру, П. Дирак указывал, что сила электростатического отталкивания между двумя электронами относится к силе их гравитационного притяжения, как $10^{40}:1$.

Отношение возраста Вселенной, оцениваемого в интервале 10^{17} — 10^{18} ко времени, которое требуется лучу света, чтобы пройти электрон в поперечнике, также равно $10^{40}:1$.

Дирак заявил, что регулярность, проявляющаяся в приведенных безразмерных числах, не является чисто случайной. «Вышеупомянутые большие числа следует рассматривать не как константы, а как простые функции данной эпохи, выраженной в атомных единицах. Мы можем принять в качестве общего принципа, что все большие числа порядка 10^{39} , 10^{78} , ..., появляющиеся в общей физической теории, должны быть с точностью до простых численных коэффициентов равны t , t^2 , — где t - данная эпоха, выраженная в атомных единицах».

Впоследствии Дирак назвал эту идею гипотезой больших чисел (ГБЧ). В 1938 году он назвал ГБЧ Фундаментальным принципом: «Любые два из очень больших безразмерных чисел, встречающихся в природе, связаны простым математическим соотношением с коэффициентами порядка единицы».

Таким образом, из теории Дирака вытекают два основополагающих следствия. Во-первых, из теории получается, что число протонов и нейтронов во Вселенной должно увеличиваться пропорционально t^2 .

Второе следствие заключается в том, что, если принять систему единиц, определяемую атомными постоянными, то гравитационная постоянная должна со временем уменьшаться пропорционально t^{-1} .

Чтобы объяснить эту теорию с точки зрения общей теории относительности, нужно предположить, что элемент длины, определяемый в римановой геометрии как $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$, не равен элементу длины, выраженному через атомные единицы, а отличается от него неким множителем. Такой множитель должен быть скалярной функцией точки, а его градиент должен указывать направление в ней среднего движения.

По мнению Г.Е. Горелика (1990), космологические построения Дирака сами по себе не оставили существенного следа в современной космологии, но совпадение больших чисел, прочитанное Дираком «слева направо»:

$$G \sim H \sim 1/t, \quad (4.4)$$

будучи прочитано справа налево:

$$t \sim 1/G, \quad (4.5)$$

стало главным основанием для антропного принципа.

Безусловно, Дирак пытался согласовать свою гипотезу с общей теорией относительности. Чтобы компенсировать рождение вещества, в 1927 году он предложил дополнительное рождение отрицательной массы. Между тем в то время не было никаких независимых подтверждений этой гипотезы.

И только спустя 75 лет, в 2002 году, существование античастиц было экспериментально доказано учеными Европейского Центра Атомных Исследований (ЦЕРН), расположенного в пригороде швейцарской Женева.

Для исследований античастиц в ЦЕРНе был построен «Антипротонный замедлитель» - замкнутая герметичная камера длиной 186 метров, где удалось со-

здать температуру минус 258 градусов по Цельсию. Лишь в этих условиях античастицы могли попасть в электромагнитную ловушку. Во время эксперимента физикам удалось зафиксировать более 50 тысяч атомов антивещества - антиводорода. Это открытие создает новые возможности для фундаментальной и прикладной физики.

В 1955 году П. Йордан попытался придать идеям Дирака соответствующую математическую форму, предположив, что гравитационная постоянная является функцией скаляра (Йордан, 1966).

Как указывает в своей работе П.Йордан: «Эта обобщенная теория тяготения, основанная на гипотезе Дирака о том, что G уменьшается со временем, приблизительно обратно пропорционально возрасту Вселенной, приобретает реальный смысл в космологии и астрономии (в связи с изучением двойных звезд, происхождением планетарных систем и астрофизическими определениями возраста небесных тел)».

П. Йордан, опираясь на геологические и геофизические данные, пришел к выводу о том, что Земля с момента ее образования претерпевает постоянный процесс расширения. Свидетельством этому, по его мнению, являются океанические и континентальные рифтовые системы, в которых земная кора подвергается тектоническим процессам расширения. Рассматривая, с точки зрения своей концепции, гипотезу дрейфа континентов А. Вегенера, он считает раскол Гондваны на отдельные континенты и их последующее отдаление ярким свидетельством правоты его теории. С этой точки зрения Йордан полностью согласен с теорией Дирака о расширяющейся Вселенной и связанным с этим постоянным уменьшением гравитационной постоянной.

Таким образом, применяя теорию Дирака в отношении развития Земли, П. Йордан (1948) приходит к следующему выводу: «В заключение я выскажу мнение, что наши современные знания о Земле, истолкованные так, как описано выше, делают гипотезу Дирака доказанным фактом, включая также то, вызывающее недоумение, обстоятельство, что во время образования Земли G должна была значительно превышать свою нынешнюю величину. Это обстоятельство (подчеркнутое Теллером в личных дискуссиях) подтверждает идею автора».

Между тем, как показало последующее развитие концепции дрейфа континентов А.Вегенера, переросшей в теорию тектоники литосферных плит благодаря работам американских ученых Хесса и Дитца, а также Вайна и Мэтьюза в 1961-1965 годах, Йордан ошибался в оценке масштабов процессов расширения Земли.

Как известно на сегодня, процессы расширения на нашей планете в зонах спрединга компенсируются процессами сжатия в зонах субдукции, с определенным сдвигом во времени, что приводит к деформациям формы Земли и неравномерным изменениям ее радиуса, носящими пульсационный характер. Данные сейсмологии и других разделов геофизики, а также геологии, однозначно подтвердили, что в зонах субдукции литосфера Земли подвергается гигантским на-

пряжениям сжатия. Это, в свою очередь, вызывает выделение в этих зонах более 80% всей сейсмической энергии планеты в виде землетрясений.

В то же время, неверная оценка процессов расширения Земли, на наш взгляд, не означает нашего несогласия с гипотезой П. Дирака о расширении Вселенной. Речь идет, скорее, о сильно преувеличенных П. Йорданом масштабах скорости расширения Земли, которая должна быть пропорциональной скорости расширения Вселенной.

После высказанной Дираком гипотезы больших чисел ряд исследователей также выдвигали различные концепции о возможных изменениях гравитационной постоянной. Так, в 50-х годах Д. Шама (1973) (работавший в то время в Кембридже) выдвинул гипотезу, основанную на принципе Маха, согласно которому инерция тела есть результат влияния масс всех удаленных объектов Вселенной. Такое влияние по своей природе является гравитационным взаимодействием, и, по мнению Шама, было бы естественно ожидать ослабления этого взаимодействия по мере увеличения размеров Вселенной.

«Из различных теорий, строящихся на переменности G , наибольший интерес вызвала скалярно-тензорная теория, предложенная в 1961 году К. Брансом и Р. Дикке из Пристонского университета и развивавшая представления П. Йордана. Исходя из принципа Маха, авторы этой теории предположили, что локальное значение G определяется структурой Вселенной, что привело к возможности изменения G не только со временем, но и от точки к точке. Уравнения теории Бранса-Дикке похожи на уравнения общей теории относительности, но, чтобы эти уравнения удовлетворяли принципу Маха, в них включена дополнительная переменная величина - «скалярное поле», которое позволяет G быть переменной» (Йордан, 1966).

В поддержку П. Йордана о преимуществах свойств скалярного поля высказывается в своей работе Р. Дикке (1965).

«Скалярное поле более перспективно. . . . Все дело в исключительной простоте такого взаимодействия, поскольку для весьма полного определения его свойств достаточно пары наблюдений и учета требования лоренц-инвариантности. Перечислим свойства дальнедействующего скалярного взаимодействия (нейтральное скалярное поле с нулевой массой покоя):

1. Скалярное поле приводит к силам притяжения между телами.
2. Скалярное поле может быть только слабым. Сила такого взаимодействия должна быть того же порядка, что и у гравитационного.
3. Скалярное поле не взаимодействует с фотонами и другими частицами, движущимися со скоростью света.
4. Скалярная сила убывает с увеличением скорости по закону:

$$V(1-v^2/c^2) \quad (4.6)$$

5. Скалярное поле может взаимодействовать с частицей тогда и только тогда, когда масса этой частицы является функцией скаляра. Отсюда следует, что при движении частицы в неоднородном скалярном поле должна совершаться работа. Это приводит к добавочной силе, действующей на вещество ввиду его взаимодействия со скаляром».

Р. Дикке (1965) внес соответствующие изменения в уравнения Эйнштейна, содержащие скалярное поле. В своих работах Р. Дикке приводит оценку уменьшения гравитационной постоянной с увеличением возраста Вселенной. По его мнению, ежегодно G ослабевает на величину порядка $Ю^{-11}$.

Приводя некоторые расчеты относительно возможного расширения радиуса Земли, Р. Дикке отмечает, что, по мере уменьшения G с течением времени, Земля расширяется. При уменьшении гравитационной постоянной на $3Т0\sim$ " в год Земля должна расширяться настолько, чтобы длина ее экватора увеличивалась приблизительно на 150 км за млрд. лет. Эта скорость расширения вычислена на основании данных о степени сжатия Земли в настоящее время. Точно так же экватор Луны должен увеличиваться примерно на 1 км за млрд. лет. В качестве геологического подтверждения своих оценок Р. Дикке (1965), так же как и его предшественник П. Йордан, приводит гигантский глубинный разлом вдоль нынешнего западного побережья Африки, в результате чего разошлись африканский и южноамериканский континенты.

Между тем, было бы, на наш взгляд, эффективнее привести гигантскую зону рифтовых разломов в Восточной Африке и Красное море, где происходят процессы растяжения литосферы в настоящее время. Необходимо учитывать, что в тот период еще не было получено убедительных геофизических данных, которые легли впоследствии в основу теории тектоники литосферных плит, учитывающей, наряду с процессами расширения, равные им по масштабам процессы сжатия Земли.

Теллер провел интересный анализ климатических условий на Земле для проверки гипотезы П. Дирака (1979). В результате своих исследований он пришел к выводу, что температура на поверхности Земли изменяется как корень четвертой степени от полученной энергии:

$$T_3 \sim (L / r^2) > \sim G^{2,25} M^{U75}. \quad (4.7)$$

На основании полученного результата Теллер подсчитал, что, если $M=\text{const}$, то около 300 млн. лет назад температура на поверхности Земли была близка к температуре кипения воды, а, следовательно, в более ранние эпохи - еще выше. Если же $M \sim t^2$, то температура на Земле около 300 млн. лет назад была ниже точки замерзания воды.

Оба результата противоречат научным данным о существовании в то время жизни на Земле.

Вышеописанный расчет основывался на оценке возраста Вселенной в 2-3 млрд. лет. Современная оценка дает $te20$ млрд. лет. В таком случае данный

расчет даст результаты, не противоречащие существованию жизни на Земле 300 млн. лет назад. Между тем время возникновения жизни на Земле также отодвигается дальше, на что и указывал Теллер (Teller, 1948).

Почода и Шварцшильд проанализировали влияние эффектов изменения G на процесс солнечной эволюции (Pochoda, Schwarzschild, 1964). Они пришли к заключению, что если $t < 1,3 \cdot 10^{10}$ лет, то гипотеза Дирака исключается, так как в этом случае Солнце не могло бы существовать как звезда главной последовательности $4,5 \cdot 10^9$ лет и прийти в наблюдаемое в настоящее время состояние. Но если $T/1,5 \cdot 10^{10}$ лет, то существует некоторое начальное количество водорода, при котором возраст Солнца находится в соответствии с наблюдаемой светимостью. Следовательно, полученные данные не могут ни подтвердить и ни опровергнуть гипотезу Дирака (1979).

В работе проанализированы результаты длительной серии радиолокации Меркурия и Венеры. Их траекторные ошибки порядка 1 км, и предел на возможную скорость изменения G , установленный ими, равен:

$$|G/G| < 4 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}. \quad (4.8)$$

По их предположениям, только продолжение эксперимента в течение пяти лет позволит повысить точность оценки на порядок, без существенного улучшения аппаратуры.

М.И. Калинин и В.Н. Мельников (1975) считают, что идея о временных вариациях констант дала толчок развитию науки в двух направлениях. 1. Изучение различных физических явлений и процессов с целью проверки гипотез о переменности констант. 2. Развитие теорий, основывающихся на этих идеях. Идея Дирака послужила мощным стимулятором в развитии теории гравитации (классической и квантовой), теории элементарных частиц и квантовой теории поля.

Интересные данные в подтверждение своей теории приводит Р. Дикке на основе изучения аномалий в движениях Луны и во вращении Земли. Так, он пишет, что ослабление тяготения с течением времени, кроме прочего, должно приводить к постепенному замедлению движения Луны по ее орбите вокруг Земли. Поэтому фактическое положение Луны должно отличаться от вычисленного в предположении постоянной величины G . На рис. 89 приведена кривая соответствующих расхождений для Луны, полученная на основании телескопических наблюдений за последние 200 лет (Дикке, 1965).

Наблюдаемые на графике рис. 89. флуктуации, по мнению Дикке, связаны с неравномерностью вращения Земли. Он указывает, что общий параболический характер графика отражает постепенное замедление вращения Луны, наряду с замедлением вращения Земли, причиной которых являются приливное взаимодействие Луны с Землей, а также Луны и Земли с Солнцем. В качестве доказательства изменений скорости вращения Земли Дикке (1965) приводит колебания уровня Мирового океана. Опираясь на вышеуказанные и другие глобальные геофизичес-

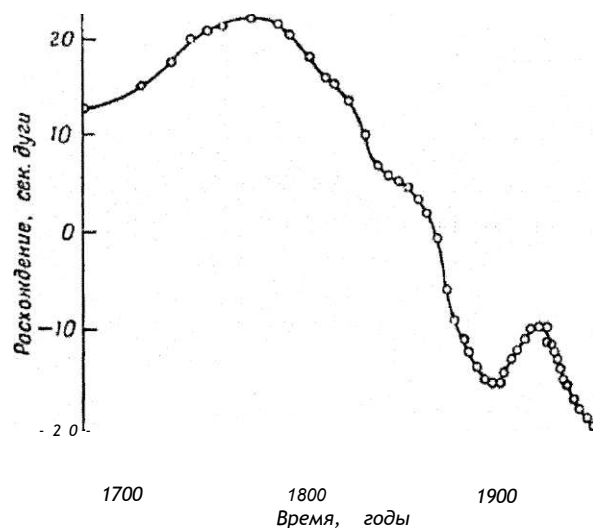


Рис. 89. Разность наблюдаемой и вычисленной долготы Луны, по данным Р. Дикке (1965)

кие факторы, Р. Дикке приходит к заключению об имеющем место фактическом уменьшении гравитационной постоянной во времени.

В 1966 г. Р. Дикке и Х. Голденберг выявили видимую разность угловых размеров экваториального и полярного радиусов Солнца, равную примерно 0,4, которая могла послужить причиной заметных эффектов.

Так, на основе теории Бранса-Дикке, смещение перигелия, вызванное релятивистскими эффектами, должно составлять 39 в столетие. Остальные 4 объясняются сплюснутостью Солнца. Полученные данные Дикке использовал для подтверждения справедливости скалярно-тензорной теории, а не общей теории относительности.

Весьма интересные подтверждения теории Дирака и исследований Дикке получены Р. Дикке и Х. Голденбергом. Ими построена численная теория движения больших планет и Луны в интервале 1715-2000 гг. и проведена обработка как современных планетных и лунных наблюдений (радиолокационных и лазерных), так и обширных рядов классических наблюдений (меридианных прохождений Меркурия и Венеры по диску Солнца, лунных покрытий), и получены некоторые результаты по экспериментальному обнаружению эффектов ОТО в пределах своих вероятностных ошибок.

Для величины G/G из совместной обработки радиолокационных наблюдений была получена статистически значащая ненулевая оценка:

$$G/G = (3,7 \pm 0,8) \cdot 10^{-9}/\text{год.} \quad (4.9)$$

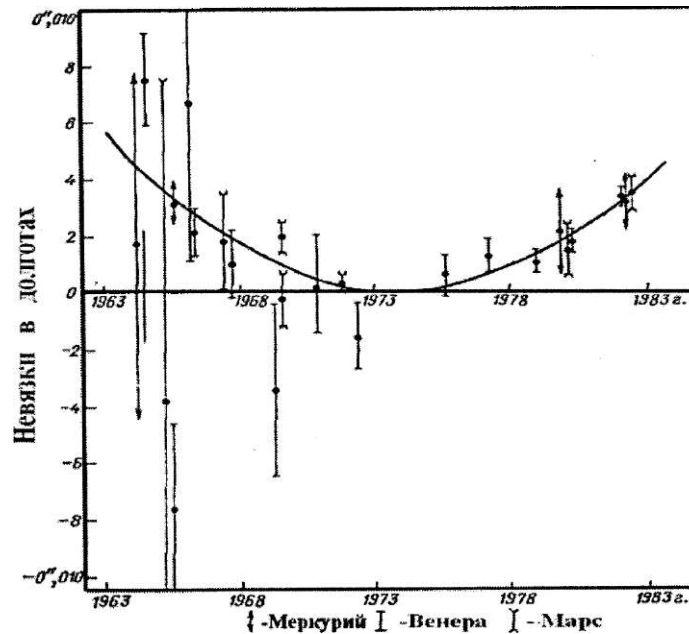


Рис. 90. Наблюдаемые невязки в долготах планет вследствие вековых вариаций гравитационной постоянной G

На рис. 90 приведены наблюдаемые невязки в долготах планет вследствие вековых вариаций гравитационной постоянной.

Парабола на рис. 90 соответствует значению $G/G=3,710''''/rofl$. Параболический тренд в невязках усматривается довольно уверенно. В результате сопоставления полученных результатов с анализом лунных лазерных наблюдений (Алешкина и др., 1987) получена следующая величина:

$$G/G = (-0,5 \pm 0,5) \cdot \text{Ю}^{-1}/\text{год}, \quad (4.10)$$

что прекрасно согласуется со значениями, полученными Дираком и Дикке.

В то же время в 1973 г. Г.Хилл со своими сотрудниками установили, что разность радиусов солнечного диска составляет всего лишь $1/5$ величины, полученной Дикке, т.е. она слишком мала, чтобы вызвать эффекты, предсказанные Брансом-Дикке.

Сотрудник Вашингтонской военно-морской обсерватории Ж. Ван Фландерн проанализировал более 8000 наблюдений времени лунных покрытий звезд за период с 1955 по 1980 гг., полученных в Японии и США, а также результаты лазерной локации Луны.

Для векового ускорения Луны он получил величину:

$$n = (-23,2 \pm 1,2) \text{ угл.с / (столетие)}^2. \quad (4.11)$$

Вычисляя «чистую» вариацию ускорения, которая может быть объяснена изменением G , и интерпретируя этот результат в рамках соответствующей модели, Ж. Ван Фландерн получил:

$$\Delta G_a/G_a = (3,2 \pm 1,1) \cdot 10^{-11} \text{ за год}. \quad (4.12)$$

Другая попытка проверки возможных вариаций G была сделана группой ученых из Калифорнийского технологического института и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (НАСА). Исследователи проанализировали 1136 измерений расстояний между станцией дальней космической связи, расположенной на Земле, и спускаемым аппаратом «Викинг» на поверхности Марса. Наблюдениями был охвачен период с июля 1976 г. по июль 1982 г. Измерения расстояний проводились с точностью 2 м, однако неточности, связанные с задержкой времени при распространении радиосигналов в межпланетной плазме, а также в самой станции слежения и в орбитальном аппарате «Викинг», увеличивают ошибку измерений до 9 м.

Кроме данных «Викинга», были использованы результаты измерений расстояний до космического аппарата «Маринер-9», находящегося на орбите вокруг Марса (с 1971 по 1973 гг.), а также радиолокационных измерений расстояний до поверхностей Меркурия и Венеры (с 1964 по 1977 гг.), лазерных измерений расстояний до Луны (с 1969 по 1970 гг.), оптических измерений положений Солнца и планет (с 1911 по 1979 гг.).

На основе этих данных была построена модель Солнечной системы, которая учитывала движение не только планет, но и астероидов. Были рассмотрены варианты этой модели с изменяющимися G и M (Милюков, 1986).

На основе решения данной задачи для Солнечной системы вычислялись: начальные значения элементов орбит Луны и планет; массы планет; массы трех астероидов, которые оказывают наибольшее влияние на орбиту Марса; средние плотности остальных астероидов; параметры $\Delta G_a/G_a$, $\Delta(GM)/(GM)_a$ и некоторые другие величины.

Было получено, что:

$$\Delta G_a/G_a = (0,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-11} \text{ за год}, \quad (4.13)$$

$$\Delta(GM)/(GM)_a = (0,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-11} \text{ за год}. \quad (4.14)$$

Таким образом, по мнению В.К. Милюкова, комплекс доступных астрономических наблюдений Солнечной системы дает ограничения вариаций величин G_a и $(GM)_a$ более жесткие, чем предсказанные П. Дираком ($\Delta G/G \sim 5 \cdot 10^{-11}$ за год) (Быковский, 1995).

В 1964 году Ф. Хойлом и Дж.В. Нарликар (Hoyl, Narlikar, 1980) была высказана теория, основанная на принципе Маха, модифицированная затем в 1971 году. Согласно этой теории, масса частицы определяется воздействием удаленных частиц. Впоследствии они дополнили эту идею тем, что удаленные частицы могут вносить как положительный, так и отрицательный вклад в массу отдельной частицы. Если бы Вселенная состояла из различных областей, составляющих как положительный, так и отрицательный вклад в массу, то на границе между ними, где положительный и отрицательный вклады взаимно компенсировались бы, массы частиц должны были бы равняться нулю.

В соответствии с рассуждениями Хойла, в процессе расширения Вселенной мировые линии частиц (галактик) уходили бы в сторону от этой границы (с нулевым значением масс частиц), в результате чего взаимная компенсация положительного и отрицательного вкладов нарушилась бы, и массы частиц начали бы возрастать. Учитывая, что радиус атома определяется массами его составных частей, увеличение массы привело бы к уменьшению размеров атомов. Следовательно, если бы фундаментальная единица масштаба длин - атом - сократилась, то увеличение расстояний между галактиками было бы только кажущимся, а на самом деле они оставались бы неизменными.

Теория Хойла-Нарликара объясняет наблюдаемое красное смещение далеких галактик как следствие изменения массы атомов. Чем меньше масса атома данного вида, тем больше должна быть длина волны испускаемого им излучения. Иными словами, чем дальше расположены атомы, тем больше красное смещение испускаемого ими излучения.

В соответствии с теорией Хойла-Нарликара, мы не можем принимать прямое излучение от галактик, которые, возможно, существуют за границей, где масса частицы равна нулю, поскольку такие частицы с нулевыми массами будут интенсивно поглощать это излучение.

К числу работ, требующих необходимости модификации ОТО, можно отнести исследования А.Д. Линде (1989), в которых показано, что учет взаимодействия гравитационного поля с материей приводит к сильной модификации гравитационной постоянной в ранней Вселенной, вплоть до изменения ее знака. В случае, когда плотность фотонов во Вселенной больше плотности нейтрино (по мнению автора гипотезы, такая возможность представляется наиболее вероятной), основной вклад в зависимость эффективной гравитационной постоянной от времени будут давать температурные поправки.

В последние годы интерес к повышению точности определения гравитационной постоянной существенно возрос.

Как известно, в квантовой электродинамике существует так называемый эффект поляризации вакуума, из-за которого на малых расстояниях $r < \hbar/m_e c$ (m_e - масса электрона) в законе Кулона возникает добавочный логарифмический член. Американский физик Д. Лонг (Long, 1976) предположил, что аналогичный механизм поляризации вакуума действует и в гравитации: вблизи некоторого

локализованного источника массы изменяется плотность «массы вакуума», что вызывает искажение ньютоновской силы гравитационного взаимодействия. Лонг описывает это искажение на обычных лабораторных расстояниях эффективной гравитационной константой:

$$G(r) = G_0(1 + X \ln(r/l \text{ см})), \quad (4.15)$$

где G_0 - гравитационная постоянная на очень малых расстояниях, X - некоторый постоянный коэффициент (коэффициент Лонга).

Д. Лонг проанализировал результаты лабораторных экспериментов по определению абсолютного значения гравитационной постоянной, сделанных с 1894 по 1969 гг., и пришел к выводу о недостаточной точности этих экспериментов для исключения или подтверждения возможности зависимости G от расстояния между взаимодействующими массами.

В 1976 году Лонг провел уникальный эксперимент. С помощью крутильных весов он определял момент силы притяжения между пробной танталовой массой, подвешенной на одном плече коромысла весов, и притягивающей массой, выполненной в виде цилиндрического кольца (поле на оси кольца более равномерно, чем у шара или цилиндра). При этом две притягивающие массы поочередно помещались на разных расстояниях от пробного тела - малое кольцо на расстоянии 4,5 см, а большое - 30 см. В результате эксперимента Лонг установил, что коэффициент 'к' в предложенной им эмпирической формуле равен $(200640) \cdot 10^{-5}$. Так появилось сообщение об экспериментальном обнаружении зависимости гравитационной постоянной G от расстояния между взаимодействующими массами (Быковский, 1995).

Впоследствии многие ученые (Р. Сперо, М. Ньюман, В. Панова, В. Фронтон, А. Кук, И. Чен, А. Мезерелла и др.) пытались повторить эксперимент Лонга с использованием традиционных крутильных весов. Но, учитывая низкую точность измерений, многие авторы не смогли обнаружить величину наблюдаемого Лонгом эффекта.

Между тем эксперименты, проведенные Кавендишской лабораторией, позволили обнаружить определенный эффект Лонга, однако в диапазоне лабораторных расстояний зависимость $G(r)$ ими не выявлена. Так, в работах Лонга (Long, 1974, 1976) предсказывается увеличение гравитационной постоянной при увеличении расстояния между взаимодействующими массами, а согласно Фудзии (Fujii, 1971), ее значение падает с расстоянием.

Существуют также две точки зрения относительно зависимости G от места измерения. Согласно одной из них, основанной на подземных измерениях силы тяжести (Stacey, 1984) гравитационная постоянная возрастает на 1% на глубине 1 км по сравнению с ее значением на поверхности Земли. В соответствии с другой точкой зрения (Ляховец, 1995) величина гравитационной постоянной должна уменьшаться с глубиной. Прямые измерения гравитационной постоянной на

глубине 30 м (Карагиоз и др., 1981) привели к заниженному, приблизительно на 1%, значению гравитационной постоянной относительно наиболее точных ее измерений на поверхности Земли. Между тем, на наш взгляд, проблема переменности G лежит вне плоскости повышения точности измерений или местоположения измерений, а в принципиальном пересмотре самих попыток интерпретации отклонений G .

В. Кануто в своей теории обобщил идею Дирака о неэквивалентности атомных и гравитационных часов и переменности G . Он считал, что в каждой теории, в том числе и в ОТО, фундаментальную единицу (например, единицу длины) получают в результате некоторой измерительной процедуры. Любой измерительный инструмент, являясь физической системой, подчиняется определенным физическим законам. Например, если в качестве эталона берется расстояние между небесными телами, мы будем иметь гравитационную (или эйнштейновскую) единицу длины. Если мы используем атомные инструменты, которые подчиняются законам квантовой электродинамики, мы получим атомную единицу длины. Ни из чего не вытекает, что эти единицы будут кратны друг другу. Следовательно, если G является константой в одной системе единиц, это не означает ее постоянство в другой (Милюков, 1986).

В соответствии с теорией В. Кануто, уравнения ОТО Эйнштейна должны быть справедливы только в гравитационных единицах. Для получения уравнений движения в атомных единицах все размерные величины, входящие в уравнения Эйнштейна, должны быть соответствующим образом преобразованы.

Весьма интересными представляются идеи К.П. Станюковича (1962) об изменении гравитационной постоянной во времени, но, в противоположность теорий Дирака, Дикке и других, речь идет не об уменьшении G с возрастом Вселенной, а об увеличении.

По мнению Станюковича, процесс «творения» и гравитационные взаимодействия всех частиц может описывать общая теория относительности, но с учетом лишь того, что гравитационная постоянная возрастает во времени. «Наша Вселенная» может представлять собой некоторое сильно нестационарное неэвклидово, по метрике, образование в бесконечной Вселенной, метрика которой в целом может быть более близкой к эвклидовой.

Дальнейшее развитие теории Станюковича привело его к следующему основополагающему выводу о том, что связь между энергиями и числом частиц различных классов носит характер соотношений для флуктуаций, что позволяет говорить о термодинамическом оправдании иерархии частиц. На основании двух гипотез, одна из которых связана с идеологией ОТО, а другая - с квантовой теорией, и, вводя два определения, можно логично получить соотношения, позволяющие вычислить все основные характеристики микро- и макромира (Станюкович, 1962).

Эволюция взглядов на метрологические аспекты регистрации G привела к весьма неожиданным результатам. Так, в своей работе К.П. Станюкович (1971)

отмечает следующее: «В разработке проблемы вариаций констант в последние годы достигнут большой прогресс. Прежде всего, в наших работах и работах ряда зарубежных авторов предложена концепция о том, что вариации безразмерных констант не носят абсолютного характера, а зависят от способа измерения - использования эталонов, систем единиц и приборов, принцип действия которых основан на определенном типе взаимодействия.

В настоящее время нет единой теории всех четырех известных типов взаимодействия. Есть теория электрослабых взаимодействий и отдельные модели с учетом сильных. Гравитационные взаимодействия можно подключать лишь на классическом уровне, когда в правую часть уравнений Эйнштейна вводят тензор энергии-импульса других полей и их взаимодействие. Поэтому современные высокоточные измерения строятся на каком-то отдельном типе взаимодействия, например электромагнитном, на основе наиболее полно разработанной квантовой электродинамики. В принципе, можно определить эталоны, ввести систему единиц, связанную с другими взаимодействиями, например с гравитационными. При этом возникают разные эталоны, основанные на динамике данного взаимодействия, например атомный эталон времени-частоты - атомная (электродинамическая) секунда, определяемая по частоте перехода в атоме Cs, и гравитационная секунда, вычисляемая по периоду движения Земли вокруг Солнца. Ниоткуда не следует, что эти единицы, определенные через различные взаимодействия, а потому и через характерные для них константы, синхронизированы во времени и в пространстве. Поэтому, возникает принципиальная возможность их рассогласования и эволюции относительно друг друга, в частности, с темпом, задаваемым эволюцией Вселенной. Вот почему при измерениях в атомной системе возможны вариации гравитационной постоянной в соответствии с ГБЧ Дирака, а при измерениях, осуществляемых в гравитационной системе, мы могли бы получить эволюцию масс всех частиц».

Проблема постоянства G тесно переплетена с возможными вариациями других фундаментальных констант, таких, как отношение массы электрона к массе протона. Так, Ю.С. Домнин и другие (Домнин, 1986) обнаружили изменение частот квантовых стандартов оптического и радиодиапазонов за период времени 4,7 года, связав это изменение с возможным изменением со временем фундаментальных физических констант, в частности, с непостоянством отношения массы электрона к массе протона,

$$\rho = m_e/m_p \quad (4.16)$$

Между тем, в работе В.Н. Мельникова (1976) на основе анализа длин волн линий водорода, наблюдаемого в спектре квазара PKS 0528-250, получена оценка верхнего предела гипотетического изменения отношения масс электрона и протона $\rho = m_e/m_p$ на космологической шкале времени. Показано, что верхний предел скорости изменения ρ равен $|\dot{\rho}/\rho| < 3 \cdot 10^{-13}$ год⁻¹. Это на два порядка ниже значения

$$\alpha / \alpha = (2,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-n} \text{ год}^{-1}, \quad (4.17)$$

соответствующего результатам лабораторных измерений, проведенных Ю.С. Домининым и др. в 1986 г.

На существующую взаимосвязь между различными фундаментальными постоянными указывает в своей работе и И.Л. Розенталь (1980). Им рассматривается взаимосвязь между безразмерными константами четырех известных взаимодействий:

$$\text{- электромагнитное взаимодействие: } a_e = e^2 / \hbar c; \quad (4.18)$$

$$\text{- гравитационное взаимодействие: } a_g = G m^2 / \hbar c; \quad (4.19)$$

$$\text{- слабое взаимодействие: } g_F = Y \text{ эрг см}^3 \text{ - константа Ферми}; \quad (4.20)$$

$$\text{- сильное взаимодействие: } a_s = g_s^2 / \hbar c; \quad (4.21)$$

Проведя исследования устойчивости микросистем и численных значений фундаментальных постоянных, И.Л.Розенталь (1987) приходит к интересным заключениям и предлагает несколько необычную, но, на наш взгляд, красивую, гипотезу о возможности существования множества Вселенных. Он отмечает: «Таким образом, фундаментальные постоянные сохраняют постоянные значения с большой точностью. Поэтому гипотеза Дирака не согласуется с экспериментальными данными. Тогда, по-видимому, остается последняя альтернатива: либо существует множество Вселенных со своими физическими законами и сочетаниями фундаментальных постоянных, либо наша Вселенная прошла через множество циклов, в начале которых сочетание фундаментальных постоянных меняется. В нынешнем цикле осуществляется комбинация констант, благоприятная для существования основных состояний». Гипотеза о существовании многих Вселенных была выдвинута на основе соображений, изложенных выше, а также некоторых космологических аргументов.

Хотя эта гипотеза кажется неожиданной, она не противоречит современному представлению о мире. «Сейчас отсутствуют физические аргументы в пользу единственности нашей Вселенной. Это утверждение верно, с одной оговоркой. Если Вселенные не взаимодействуют между собой, то нет никаких физических проблем. Если взаимодействие возможно, то тогда возникает вопрос об их сосуществовании при различных наборах фундаментальных постоянных. Чтобы пояснить возникающую проблему, мы разобьем фундаментальные постоянные на три класса: безразмерные константы a , квантовые числа элементарных частиц: e , τ , μ и т.д., и размерные фундаментальные константы: G , $\hbar$ и c .

Представление о взаимодействии объектов с одинаковыми физическими законами, но с различными фундаментальными постоянными двух первых классов

- тривиально. Однако контакт объектов с двумя различными значениями с противоречит частной теории относительности, с двумя различными значениями G - противоречит ОТО. Нелегко (а может быть, и невозможно) построить непротиворечивую квантовую механику с двумя различными значениями $\hbar$. По-видимому, эта проблема (на уровне современных знаний) теряет свою остроту, если идет речь об изменении констант при прохождении Вселенной через сингулярность» (Розенталь, 1984).

И.Л. Розенталь (1980) чрезвычайно осторожно излагает свою гипотезу о возможности существования множества Вселенных, при этом делая целый ряд оговорок: «Хотя гипотеза о существовании многих Вселенных кажется естественной, она противоречит укоренившемуся со времени Ньютона девизу: гипотез не измышлять. А если и нарушать это правило, то принято предлагать метод непосредственной проверки гипотезы. Мы не знаем (и, возможно, никогда не узнаем), как связаться с другими Вселенными. Все же можно в пользу этой гипотезы выдвинуть некоторые косвенные аргументы, основанные на принципе целесообразности».

В своей работе В. Гейзенберг (1968) сформулировал нелинейное уравнение, содержащее единственную константу, имеющую размерность длины. Ученый надеялся, что это уравнение станет основой для создания единой теории и позволит установить связи между различными фундаментальными постоянными. В рамках этой теории было получено соотношение:

$$a \sim 0,4 (m/m_p)^2 \sim 1/120, \quad (4.22)$$

незначительно отличающееся от константы a_e . Это соотношение является характерным примером зависимости между фундаментальными постоянными, не связанной с принципом целесообразности. Хотя теория Гейзенберга сыграла выдающуюся роль в стимулировании создания единой теории, развитие последней пошло по иному пути. Нам хотелось бы привести дословно чрезвычайно интересные, на наш взгляд, заключения И.Л. Розенталя (1980), касающиеся проблемы множественности Вселенных: «По существу, сейчас можно определенно утверждать, что, изменяя одну из фундаментальных постоянных при неизменности остальных, мы нарушим условия существования основных состояний. Особенно критично существование основных состояний к значению констант a_e , a_g , a_s .

Далее, возникает вопрос: нельзя ли, изменяя одновременно две константы, снова получить оптимальные условия для существования основных состояний? Такое допущение кажется маловероятным, поскольку константы входят во многие соотношения, определяющие существование основных состояний, - соотношения, которые будут нарушены при изменении второй константы. Едва ли сейчас можно показать, что одновременное «удачное» изменение всех констант в пределах 1-2 порядков не сможет обеспечить существование основных состояний, имеющих, впрочем, иные свойства, чем в нашей Вселенной.

Отметим, что создание физической картины Вселенных с набором фундаментальных постоянных, существенно отличающихся от совокупности фундаментальных постоянных в нашей Вселенной, является довольно увлекательной задачей. Необходимость (в указанном смысле) набора фундаментальных постоянных ставит исключительно серьезный вопрос: почему природа выбрала именно этот набор? Пока наиболее вероятен ответ: существует множество Вселенных, и этот выбор имеет «случайный» характер. Является ли этот ответ окончательным, покажет дальнейшее развитие единой теории поля. Опровергнуть его можно путем полного осуществления конечной цели программы Гейзенберга: связать все фундаментальные постоянные между собой на основе одного параметра.

Другой возможной альтернативой принципу целесообразности явилась бы теория, в рамках которой численные значения всех фундаментальных постоянных определялись бы исключительно размерными константами G , h , c . Однако, эта идея, сформулированная еще Планком, не нашла конкретного воплощения». По мнению И.Л. Розенталя (1987), гравитационная постоянная все же остается константой, по крайней мере ее вариации существенно ниже прогнозируемых. В качестве аргумента приводятся результаты исследований межпланетных космических станций «Маринер-6» и «Маринер-7», которые, пройдя мимо Марса, превратились в искусственные спутники Солнца. Когда весной 1970 г. станции оказались с другой стороны Солнца по отношению к Земле, их направленное на Землю излучение проходило в непосредственной близости от Солнца (на расстоянии 1 млн. км от его центра), где силы тяготения достаточно велики (радиус Солнца 700 тыс. км). Согласно общей теории относительности, в присутствии гравитационного поля Солнца пространство-время негалилеево и пространство неевклидово. Соответственно этому, радиолуч, проходящий вблизи края солнечного диска (рис. 91), для наблюдателя на Земле должен испытывать релятивист-

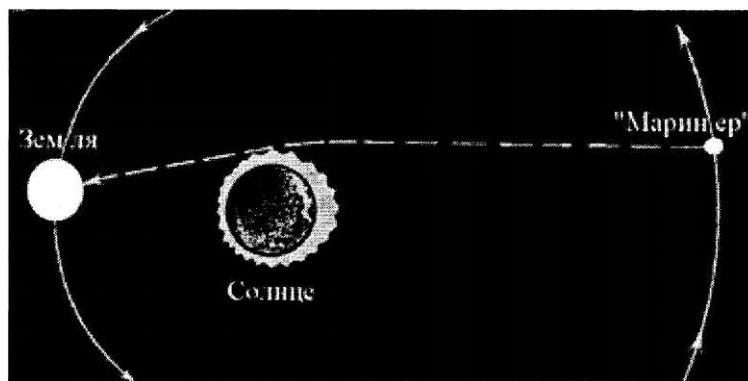


Рис. 91. Радиолуч (пунктир), испущенный искусственным спутником Солнца («Маринер») и проходящий вблизи края солнечного диска, для наблюдателя на Земле испытывает не только искривление, но и дополнительную релятивистскую задержку во времени, связанную с замедлением времени и с удлинением расстояния в гравитационном поле Солнца (Горелик, 1998)

скую задержку во времени, являющуюся результатом замедления времени и удлинения расстояний. Время прохождения сигнала от спутника Солнца до Земли увеличивается в этом случае по общей теории относительности на 200 мксек. Современные методы радиоастрономии позволяют зарегистрировать этот релятивистский избыток (Горелик, 1998).

«Приборы, расположенные на зондах «Маринер-6» и «Маринер-7», запускались по команде с Земли, положение приборов в пространстве определялось с очень высокой точностью - до 30 м на расстоянии 400 млн. км. Анализ по времени и частоте радиосигналов, испускаемых «Маринером-6» и «Маринером-7», проведенный радиоастрономами станции Голдстоун, позволил измерить релятивистский избыток с точностью до 2-3 %. С этой точностью измеренная величина релятивистской задержки совпала с эйнштейновским значением (200 мксек). Теория Бранса-Дикке, в которой предполагается слабое непостоянство гравитационной постоянной, предсказывает для релятивистской задержки величину, на 7% меньшую - 185 мксек. Таким образом, результаты этого эксперимента позволяют либо отвергнуть теорию Бранса-Дикке, либо уменьшить допустимую величину возможных эффектов, связанных с этой теорией» (Горелик, 1990).

Несмотря на столь категоричное заключение И. Горелика (1990) в пользу постоянства G , продолжают публиковаться результаты научных исследований и экспериментальных данных, свидетельствующие о существенных вариациях измеренных значений гравитационной постоянной, значительно превышающих погрешность измерений. Так, в 1999 году группа российских ученых - В.П. Измайлов, О.В. Карагиоз и А.Г. Пархомов (1999) - опубликовала результаты своих исследований вариаций измерений гравитационной постоянной, несколько модернизировав классический опыт Кавендиша.

Определения G проводилось по величине периода крутильных колебаний коромысла с закрепленными на его концах пробными массами. Коромысло подвешивалось на тонкой нити в вакуумной камере, а специальная система подавляла колебания, отличные от крутильных. Вне вакуумной камеры располагались эталонные массы - шары весом около 4 кг. Эталонные массы перемещались электроприводом по заданной программе и фиксировались в определенных положениях с погрешностью около 1 мкм.

Для снижения возможных ошибок, связанных с магнитным полем, установка была изготовлена из немагнитных материалов (бериллиевая бронза, алюминий, нержавеющая сталь, медь); вокруг вакуумной камеры размещался магнитный экран из пермаллоя. Определение амплитуды и периода колебаний производилось при помощи оптоэлектронной системы.

С 1985 по 1997 гг. В.П. Измайловым, О.В. Карагиозом и А.Г. Пархомовым (1999) было выполнено около 40 тысяч измерений. Указанные ученые получили усредненное значение по всем измерениям $6,6729 \cdot 10^{-11} \text{ М}^3 \text{ Кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$. Однако, по мнению самих же авторов, судить о том, насколько точно это значение соответствует «истинной» величине гравитационной постоянной, нельзя, поскольку усредне-

ния по фрагментам массива полученных значений G дают достоверно различающиеся значения.

Так, измерения с 19.10.95 по 25.01.96 дали:

$$G = (6,67263 \pm 0,00013) \cdot \text{Ю}^{-1} \text{кг} \cdot \text{с}^{-2},$$

тогда как с 21.03.93 по 13.07.93 было получено значение:

$$G = (6,67369 \pm 0,00020) \cdot \text{Ю}^{-1} \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$$

(указано стандартное отклонение среднего значения).

Полученные вариации G О.В. Карагиоз и В.П. Измайлов (1992, 1996), <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/GravConst/wercome.html> сравнивают с фазами роста и спада солнечной активности (чисел Вольфа) (рис. 92).

Представленные на рис. 92 данные разбиты на 21 массив близких по времени измерений. Показаны значения G , усредненные по каждому из этих массивов.

Горизонтальная черта соответствует продолжительности массива, вертикальная - стандартному отклонению среднесуточных значений.

Ось G - значения G , начиная со второй цифры после запятой, так как первые две цифры остаются неизменными.

По мнению В.П. Измайлова и др. (1993), О.В. Карагиоза и др. (1987, 1992, 1996), обращает на себя внимание совпадение периодов наибольшей нестабильности полученных значений G (87-88 и 92-93 годы) с фазами роста и спада солнечной активности. В максимумах и минимумах солнечной активности (1989-1991 и 1994-1996 годы) результаты более стабильны. Повышенный разброс результатов в 1985-1986 годах связан с несовершенством ранних измерений.

Более детальная информация о результатах G представлена на рис. 93.

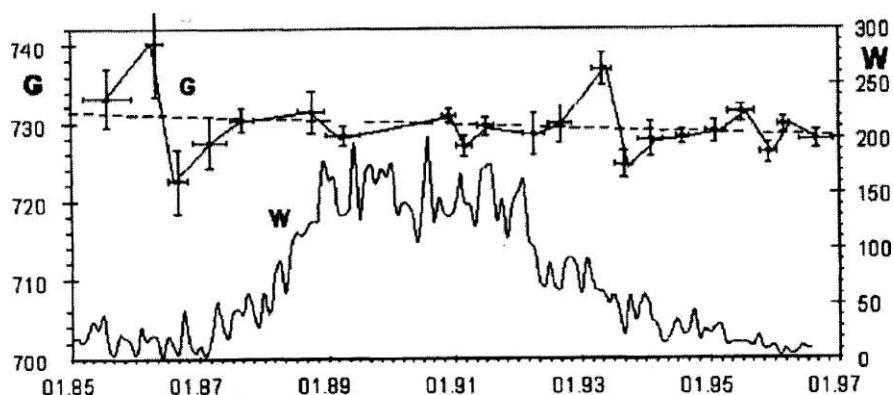


Рис. 92. Результаты измерений гравитационной постоянной G , усредненные по отдельным массивам, и среднесесячные значения чисел Вольфа W (Измайлов, 1993)

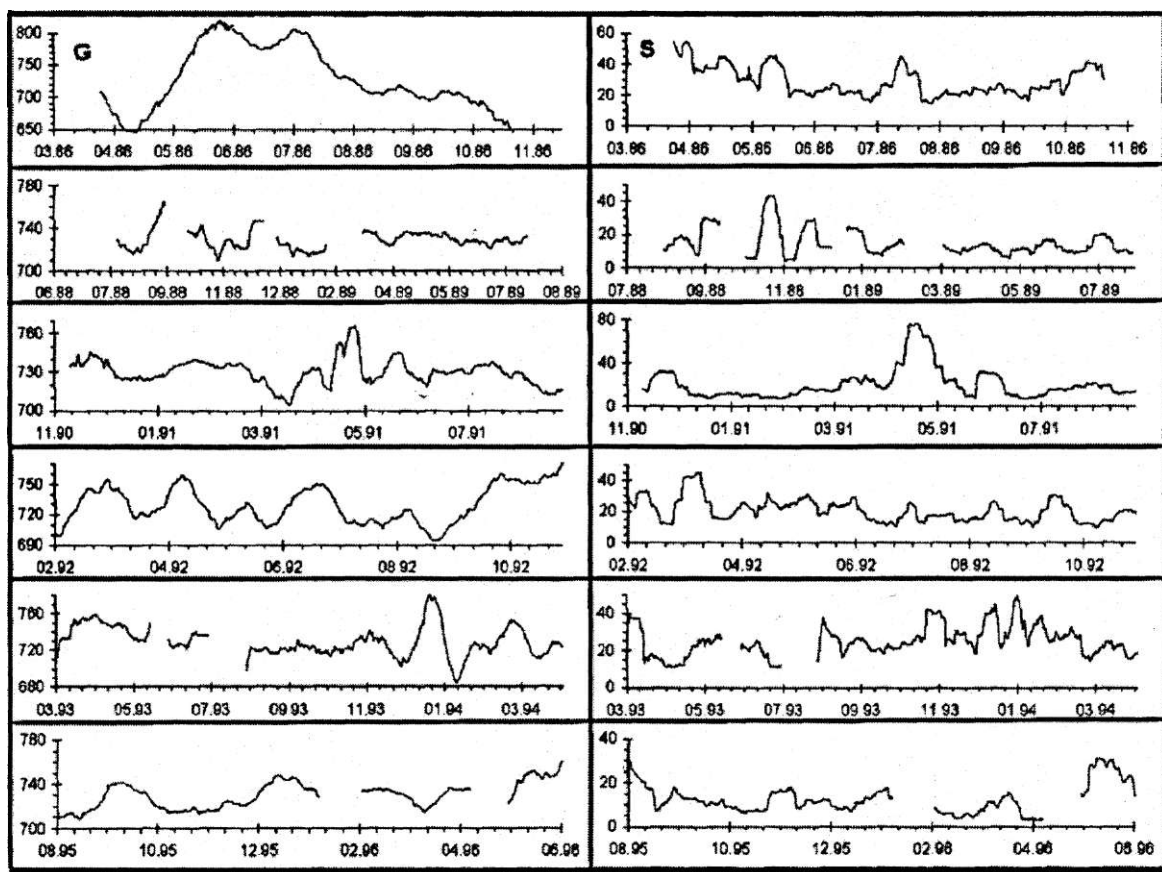


Рис. 93. Показано скользящее 15-суточное усреднение, полученное для отдельных фрагментов, а также стандартное отклонение пятнадцати соседних суточных значений G, В.П.Измайлов и др. (1993), О.В. Карагиоз и др. (1992)

На некоторых участках изображенных кривых можно заметить отчетливую ритмичность. Взаимосвязь G и S не проявляется с очевидностью.

Анализ ритмичности в вариациях G привел вышеуказанных исследователей к заключению о существовании достаточно отчетливых ритмов в вариациях гравитационной постоянной с периодами 85, 53, 39, 23, 21, 17 и 9 суток. Эти же вариации (за исключением 39-суточного) авторами обнаружены в вариациях солнечной и геомагнитной активности.

Таким образом, анализ цикличности G приводит авторов к предположению о весьма высокой вероятности связи вариаций измерений гравитационной постоянной с солнечной и геомагнитной активностью.

По мнению В.П. Измайлова и др.(1999), О.В. Карагиоза и др. (1992), наличие ритмов с периодами 28-30 и 14-15 суток, близкими к сидерическому и синодическому лунным месяцам (27,3 и 29,5 суток) и их половине, указывает на то, что результаты измерений G связаны с положением Луны относительно звезд и/или с лунными фазами (взаимным положением Луны, Земли и Солнца).

Подводя итоги своих исследований, вышеуказанные ученые пришли к следующему заключению: «Анализ вариаций результатов измерений гравитационной постоянной показывает, что они связаны с целым рядом космических и геофизических явлений. Разумно предположить, что этот анализ выявляет не изменение величины физической константы - гравитационной постоянной, а действие каких-то не учитываемых исследователями факторов, прямо или косвенно влияющих на результаты измерений.

Многолетние поиски этих факторов не привели к успеху (Даглас, Брагинский, 1983). Проведенные исследования показали, что изменения геомагнитного поля, нестабильность температуры и атмосферного давления, потоки остаточного газа в вакуумной камере, изменения наклона установки не могут привести к наблюдаемым эффектам. Вариации гравитационного поля, связанные с изменением взаимного положения Земли, Луны и Солнца, слишком малы для непосредственного ощутимого влияния на результаты измерений, но можно предположить их косвенное проявление, например через микросейсмы.

Исследование эффектов, связанных с микросейсмами, является весьма сложной задачей. Теоретически выяснена принципиальная возможность их влияния на результаты измерений величины G , однако вопрос о том, является ли именно этот фактор главным, остается пока открытым» (Карагиоз, Измайлов, 1996).

Вышеприведенное заключение в какой-то степени отражает растерянность авторов слишком большими отклонениями G , существенно превышающими погрешность измерений. Несмотря на попытку связать наблюдаемые временные вариации G с различными космическими факторами, авторы приходят к заключению, что они не могут являться причиной столь значительных отклонений.

Ниже приводится таблица 21 экспериментальных значений гравитационной постоянной G , полученных в различные годы разными авторами.

Таблица 21

Экспериментальные значения гравитационной постоянной G , полученные в различные годы разными авторами, начиная с опытов Генри Кавендиша в 1798 г. и по 1999 г. (Мировой Центр Данных по физике твердой Земли, Карагиоз, Измайлов)

Авторы	Год	Страна	Значение G , $10^{-11} \text{ Н м}^2 \text{ кг}^{-2}$	Порядко- вый номер
Cavendish H.	1798	Англия	$6,74 \pm 0,05$	1
Reich F.	1838	Германия	$6,63 \pm 0,06$	2
Baily F.	1843	Англия	$6,62 \pm 0,07$	3
Cornu A., Bailie J.	1873	Франция	$6,63 \pm 0,017$	4
Jolly Ph.	1878	Германия	$6,46 \pm 0,11$	5
Wilsing J.	1889	Германия	$6,594 \pm 0,015$	6
Poynting J.H.	1891	Англия	$6,70 \pm 0,04$	7
Boys C.V.	1895	Англия	$6,658 \pm 0,007$	8
Eotvos R.	1896	Венгрия	$6,657 \pm 0,013$	9
Brayn C.A.	1897	Австрия	$6,658 \pm 0,002$	10
Richarz F. & Krigar-Menzel O.	1898	Германия	$6,683 \pm 0,011$	11
Burgess G.K.	1902	Франция	$6,64 \pm 0,04$	12
Heyl P.R.	1930	США	$6,670 \pm 0,005$	13
Zaradnicek J.	1933	Чехослов.	$6,66 \pm 0,04$	14
Heyl P., Chrzanowski P.	1942	США	$6,673 \pm 0,003$	15
Rose R.D. et al.	1969	США	$6,674 \pm 0,004$	16
Facy L., Pontikis C.	1972	Франция	$6,6714 \pm 0,0006$	17
Renner Ya.	1974	Венгрия	$6,670 \pm 0,008$	18
Koldewyn W., Faller J.	1976	США	$6,57 \pm 0,17$	19
Сагитов М.У. и др.	1977	СССР	$6,6745 \pm 0,0008$	20
Luther. G., Towler W.	1982	США	$6,6726 \pm 0,0005$	21
Boer H., Haars H., Michaelis W.	1987	Германия	$6,667 \pm 0,0007$	22
Saulnier M.S., Frisch D.	1989	США	$6,65 \pm 0,09$	23
Fitzgerald M.P., Armstrong T.R.	1995	Новая Зеландия	$6,6656 \pm 0,0009$	24
Walesch H., Meyer H., Piel H., Schur J.	1995	Германия	$6,6685 \pm 0,0011$	25
Michaelis W., Haars H., Augustin R.	1996	Германия	$6,7154 \pm 0,0008$	26
Карагиоз О.В., Измайлов В.П.	1996	Россия	$6,6729 \pm 0,0005$	27

таблица 21 (окончание)

Bagley C.H., Luther G.G.	1	США	$6,6740 \pm 0,0007$	28
Schwarz W., et al.	1998	США	$6,6873 \pm 0,0094$	29
Luo J., Hu Z.K., Fu X.H., Fan S.H., Tang M.X.	1999	Китай	$6,6699 \pm 0,0007$	30
Fitzgerald M.P., Armstrong T.R.	1999	Новая Зеландия	$6,6742 \pm 0,0007$	31
Richman S.J., Qunn T.J., Speake C.C., Davis R.S.	1999	Англия	$6,6830 \pm 0,0011$	32
Nolting F., Schurr J., Schlamminger S., Kundig W.	1999	Швейцария	$6,6754 \pm 0,0015$	33

Для наглядности демонстрации разброса значений G , приведенных в таблице 21 и полученных разными авторами в разные годы, нами был построен график (рис. 94).

Приведенный график отчетливо показывает существующий разброс в значениях G , полученных разными исследователями, начиная с Генри Кавендиша.

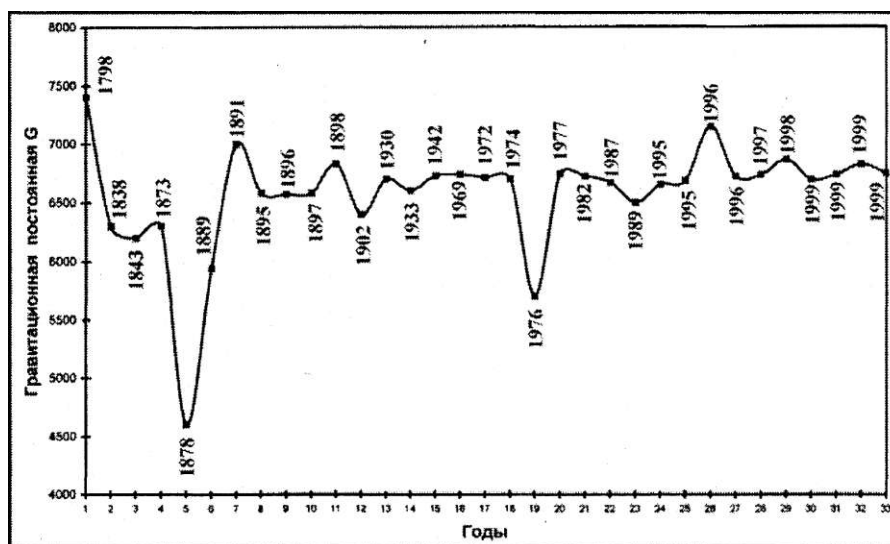


Рис. 94. График разброса значений G , приведенных в таблице 21 и измеренных разными авторами в разные годы

По оси Y указаны значения G , начиная с первого знака после запятой; по оси X указаны порядковые номера измеренных значений G , приведенных в таблице 21

Между тем корректность значений G , измеренных в 1878 г. и в 1976 г., вызывает сомнение в связи с чрезвычайно высоким отклонением.

Исходя из вышеизложенного, нами эти два значения были аппроксимированы и им были присвоены, на наш взгляд, более реальные величины. После отбраковки этих двух точек, был повторно построен график разброса значений G (рис. 95).

Как видно из данного графика, вряд ли вызывает сомнение достоверность вариаций гравитационной постоянной. Между тем, данный график следует рассматривать исключительно как демонстрационный, и он, к сожалению, не может быть использован для серьезного последующего анализа, в связи с недостаточной представительностью данных.

Для детальных и глубоких исследований вариаций G необходим массив информации, полученной с определенной установленной периодичностью, с помощью одного и того же или, по меньшей мере, идентичного измерительного прибора. При этом результаты измерений должны быть статистически достоверными, с учетом погрешностей приборов и возможного влияния внешних факторов.

Указанным условиям, на наш взгляд, полностью соответствует массив экспериментально измеренных значений G с 1985 по 2000 годы, созданный О.В. Карагиозом и В.П. Измайловым и помещенный в Мировом Центре Данных по физике твердой Земли. Ниже приводится табл. 22, в которой приведены усредненные за год значения G с 1985 по 2000 годы.

На основании значений G , приведенных в табл. 22, нами был построен график вариаций G с 1985 по 2000 годы, приведенный на рис. 96. Как отчетливо

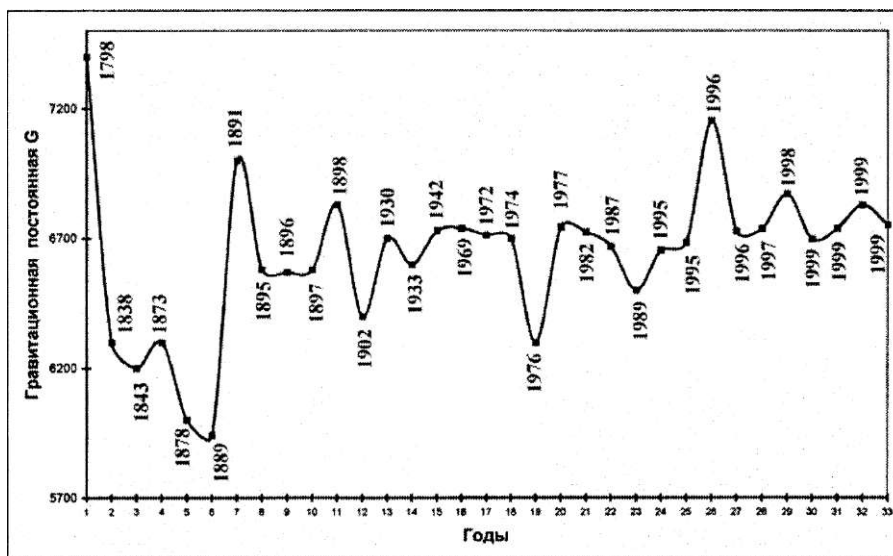
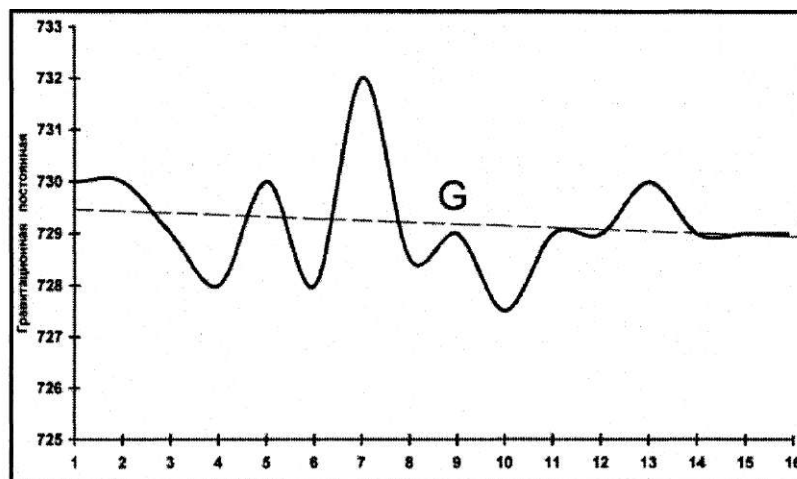


Рис. 95. График разброса значений G приведенных в таблице 21 и измеренных разными авторами в разные годы (после отбраковки значений G , измеренных в 1878 и 1976 гг.)

Таблица 22

Усредненные за год значения G с 1985 по 2000 годы

Годы	Количество измерений	G , Ю- ¹¹ $\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
1985	2140	6,6730
1986	5050	6,6730
1987	2496	6,6729
1988	2643	6,6728
1989	3531	6,6730
1990	4287	6,6728
1991	4559	6,6732
1992	6694	6,6728
1993	8046	6,6729
1994	2362	6,6727
1995	5927	6,6729
1996	4996	6,6729
1997	5015	6,6730
1998	6726	6,6729
1999	3673	6,6729
2000	4413	6,6729

Рис. 96. График вариаций G с 1985 по 2000 годы по усредненным значениям за год (по данным табл. 22)

По оси Y указаны значения G со второго знака, после запятой (с целью удобства отображения); по оси X указаны порядковые номера значений G в табл. 22, соответствующие годам (с 1985 по 2000); прямой пунктирной линией изображен прямолинейный тренд

видно из приведенного графика, в течение 16 лет, за период с 1985 по 2000 годы гравитационная постоянная G испытывала существенные вариации, значительно превышающие погрешность измерительного прибора. Данная кривая является

статистически достоверной и корректной и, на наш взгляд, отображает реальные изменения измеренных значений G . В настоящем разделе мы не будем останавливаться на детальном анализе наблюдаемых вариаций, а только лишь отметим, что, как отчетливо наблюдается на графике, кривая вариаций G имеет ярко выраженный волновой характер изменений на фоне прямолинейного тренда.

Описанные в данном разделе результаты исследований показывают, что, по мере повышения точности измерений значений G , странным образом увеличиваются различия между ними. Так, до настоящего времени два наиболее точных измерения G были получены группами ученых в Вашингтонском Университете в Сиэтле и Международном бюро мер и весов под Парижем, причем в обоих случаях ошибки эксперимента составляли $1/10000$, однако разница полученных значений превышает возможные погрешности в 10 раз.

Попытка Жан-Поля Мбелека (Jean-Paul Mbelek) и Марка Лашьез-Рая (Marc Lachieze-Ray) из французской комиссии по атомной энергии объяснить причину таких расхождений между экспериментальными данными влиянием магнитного поля Земли, которое отличается в зависимости от географического положения лаборатории, где проводились измерения, не встретили понимания у их коллег.

В частности, руководитель группы швейцарских физиков из Университета Цюриха Стефан Шламингер считает результат измерений французских ученых неверным.

Растерянность и споры ведущих ученых Мира вполне можно понять, если принять во внимание описанные выше сверхточные космологические и наземные эксперименты по возможности вариаций G в течение миллиардов лет, которые приводят к выводу о неизменности гравитационной постоянной, а в случае допуска таких вариаций они оцениваются А.Д. Линде (1984) в пределах:

$$G/G = (-0,5 \pm 0,5) \cdot 10^{11}/\text{год}. \quad (4.23)$$

Между тем отклонения G , установленные В.П. Измайловым, О.В. Карагиозом и др. и французскими учеными, исчисляются не годами, а часами, сутками и месяцами и даже зависимостью от пространственного расположения измерительных приборов.

Можно было бы говорить об ошибках, связанных с погрешностью измерений или неучтенными помехами, если бы это были единичные случаи. Между тем разноречивой в измеренных значениях G наблюдается широкомасштабно, на протяжении последних десятилетий, увеличиваясь пропорционально повышению прецизионности измерений.

С одной стороны, основные положения ОТО прекрасно подтверждаются как наземными наблюдениями, так и астрономическими. С другой - наблюдаемые вариации значений G , безусловно, не могли бы остаться незамеченными астрономическими измерениями. Между тем, G «никак не хочет стабилизироваться» в земных условиях.

Возможно, причина кроется не в вариациях G , а в некотором глобальном факторе, влияющем на взаимодействие масс в земных условиях. Как нами уже было отмечено, таким фактором могут являться гравитационные волны.

4.3. ВОЗМОЖНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ВАРИАЦИЯХ ИЗМЕРЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ

Как нами было отмечено в предыдущем разделе, в измеренных значениях гравитационной постоянной отмечаются существенные вариации. Примечательно, что вариации наблюдаются не только в значениях G , измеренных в разное время и разными исследователями, что в какой-то мере можно было бы попытаться объяснить отличиями в погрешностях технологий измерений, но и в значениях G , измеренных одними и теми же исследователями в течение многих лет (Измайлов и др., 1999). Примечательно, что в вариациях G , значения которых были усреднены за год, четко отмечаются гармонические колебания, анализ которых представляет большой интерес. Так, по данным О.В. Карагиоза и др. нами был составлен график вариаций измеренных значений гравитационной постоянной с 1985 по 2000 годы, при этом использовались усредненные за год значения G . На графике рис. 97 отчетливо выделились гармонические колебания волнового характера.

На график вариаций G был наложен тренд, аппроксимированный синусоидой GW_2 . Данная синусоида, отражающая, на наш взгляд, прохождение через Землю гравитационной волны второго порядка, описывается уравнением:

$$y(x) = 729,14 + \sin(0,947x + 7). \quad (4.24)$$

Как видим из рис. 97, синусоидальный тренд практически идеально описывает гармонический характер наложенного на вариации G волнообразного процесса. Таким образом, становится очевидным, что наблюдаемые вариации значений G являются результатом наложения двух гармонических колебаний, отраженных на графиках GW_1 и GW_2 . Условно назовем эти кривые гравитационной волной первого порядка « GW_1 » (gravitational wave) и гравитационной волной второго порядка « GW_2 ».

Становится очевидным, что вариации измеренных значений гравитационной постоянной G носят отчетливый волновой характер. Период колебаний волны GW_1 составляет ~2—2,5 года. Длина данной гравитационной волны составляет $-23,652 \cdot 10^{15}$ м. Максимальная амплитуда волны GW_1 составляет:

$$A_1 = 0,00023 \cdot 10^{-10} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}. \quad (4.25)$$

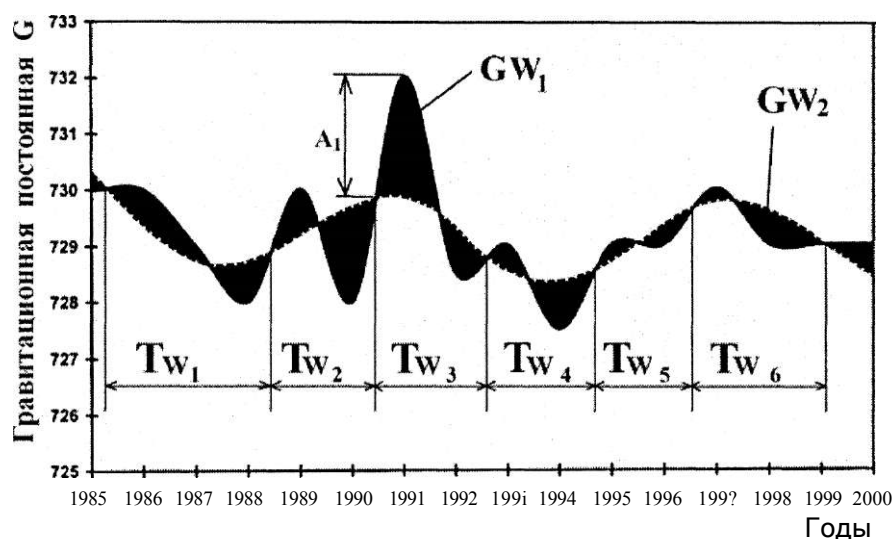


Рис. 97. График фактических значений вариаций гравитационной постоянной G с 1985 по 2000 годы, усредненных по годам

Ось G — значения G начиная со второй цифры после запятой; GW_1 — график фактических значений вариаций гравитационной постоянной, усредненных за год (гравитационная волна первого порядка); GW_2 — тренд, аппроксимированный синусоидой (гравитационная волна второго порядка); $TW_1 \dots TW_n$ — периоды гравитационных волн первого порядка; A_1 — максимальная амплитуда гравитационной волны первого порядка

Таким образом, можно констатировать, что гармонические колебания несущей частоты GW_1 модулированы по амплитуде модулирующим низкочастотным сигналом GW_2 .

Представляет интерес исследование параметров гравитационной волны второго порядка GW_2 . На рис. 98 приведен график GW_2 .

Как видно из рис. 98, график GW_2 отражает практически идеальный волновой процесс, на котором выделены две полные волны с периодом $T, W = T, W = 7,7$ лет. Длина данной волны составляет $70,956 \cdot 10^{15}$ м. Амплитуда гравитационной волны второго порядка составляет:

$$A_2 = 0,00008 \cdot 10^{11} \text{ Н м}^2 \text{ кг}^{-2}, \quad (4.26)$$

В то же время отчетливо видно, что в наблюдаемом волновом процессе содержится тренд. Наиболее достоверно общий характер наложенного процесса отражает тренд GW_3 , аппроксимированный полиномиальным рядом второй степени и описываемый уравнением:

$$y = 0,0077x^2 - 0,1677x + 729,89. \quad (4.27)$$

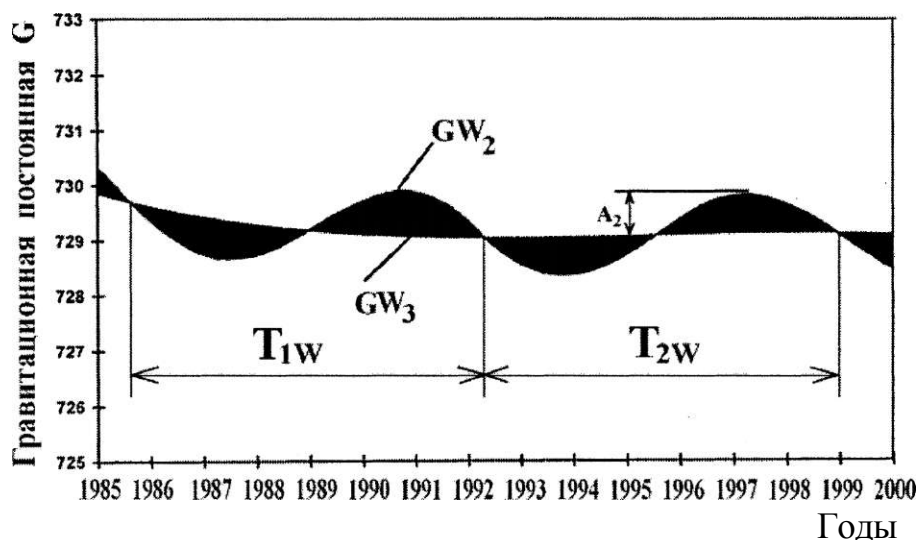


Рис. 98. Синусоидальный тренд фактических значений вариаций гравитационной постоянной G с 1985 по 2000 гг.

Ось G — значения G начиная со второй цифры после запятой; GW_2 — синусоидальный тренд фактических значений вариаций G ; GW_3 — тренд аппроксимированный полиномиальным рядом второй степени; T_1W ; T_2W — периоды гравитационных волн второго порядка; A_2 — амплитуда гравитационной волны второго порядка

На наш взгляд, кривая GW_3 является фрагментом еще более низкочастотной волны, выявление которой не представляется возможным из-за отсутствия достоверных данных измеренных значений гравитационной постоянной G за более длительный период времени. Возможный период гравитационной волны третьего порядка может составлять, по нашим оценкам, 40-60 лет.

Таким образом, анализ вариаций измеренных значений G привел нас к заключению о том, что они отражают волновые изменения G , являющиеся результатом наложения трех гармонических процессов (гравитационных волн трех порядков) с периодами 40-60 лет, 7,7 лет и 2-2,5 года.

4.4. О РЕАКЦИИ ВЕСОВ КАВЕНДИША В ПОЛЕ ПРОХОДЯЩЕЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

Согласно ОТО, гравитационное поле изменяет пространственно-временной континуум. Гравитационные волны отличаются по своей природе и характеру проявления от электромагнитных и акустических волн, и их существование впервые было выведено А.Эйнштейном (1965) в общей теории относительности. Осо-

бенностью гравитационной волны является то, что при прохождении через пространство и тела она не только деформирует их, но и оказывает знакопеременное влияние на взаимодействие масс, расположенных в той области пространства, которая охвачена гравитационной волной, длина полупериода которой превышает расстояние между центрами масс.

Рассмотрим пример прохождения гравитационной волны через Землю, когда длина полупериода волны существенно превышает диаметр Земли (рис. 99).

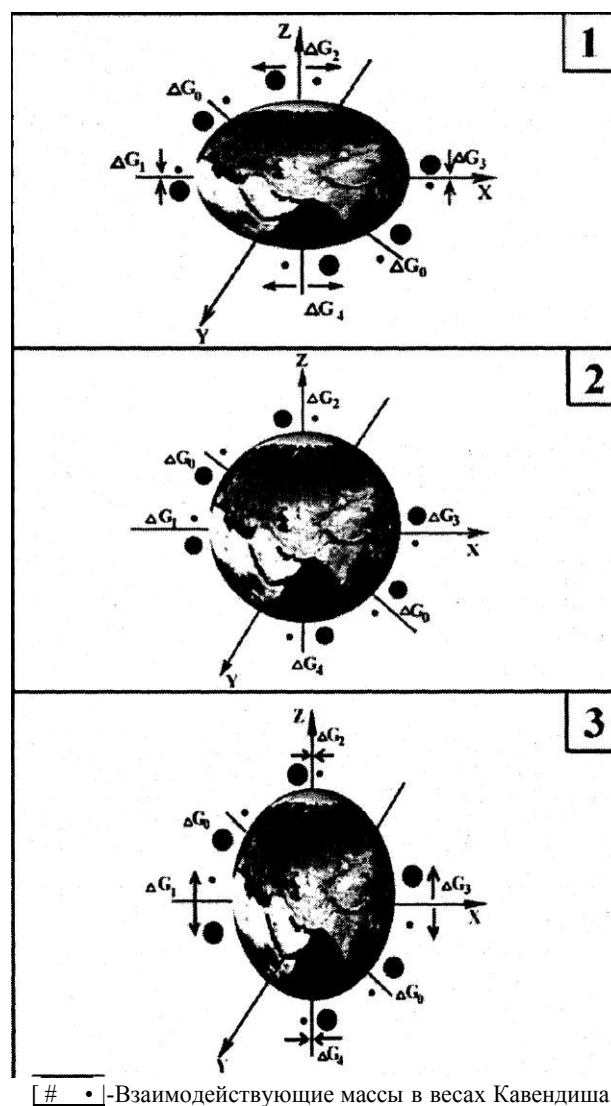


Рис. 99. Модель влияния низкочастотной гравитационной волны на взаимодействие масс в весах Кавендиша в зависимости от их географического расположения

Естественно, что взаимодействующие массы на поверхности Земли, находясь в поле проходящей гравитационной волны, будут вести себя по-разному, в зависимости от ориентации радиуса взаимодействия этих масс по отношению к фронту волны. Если массы ориентированы таким образом, как это показано на рис. 99, влияние и гравитационной волны на их взаимодействие между собой будет происходить так, как это изображено на рисунке.

На рис. 99-1 показано изображение деформации Земли при прохождении первого полупериода гравитационной волны и реакция на ее прохождение взаимодействующих масс в весах Кавендиша. Как видно, взаимодействие масс в районе полюсов при данной ориентации покажет понижение значения гравитационной постоянной и ее повышение на экваторе.

В то же время в момент смены полупериодов гравитационной волны значение G будет примерно одинаковым во всех областях Земли (рис. 99-2). При прохождении второго полупериода волны, в области экватора массы будут взаимодействовать слабее, а в области полюсов - сильнее, что отразится в виде снижения значений гравитационной постоянной, измеренной в экваторе и ее повышения в полюсах (рис. 99-3). Однако изменение ориентации коромысла с грузами в весах Кавендиша по отношению к направлению распространения гравитационной волны приведет к другим результатам значений гравитационной постоянной.

Как оказалось, на показания весов Кавендиша влияет не только географическое расположение измерительных лабораторий, но и пространственная ориентация измерительного устройства относительно фронта распространения гравитационной волны.

Получаемые различными лабораториями значения G , как указывалось выше, существенно различаются между собой, в связи с чем J.-P. Mbelek и M. Lachieze-Rey (2002) разработали модель, объясняющую различия в значениях G влиянием географического расположения измерительных лабораторий, при этом, по их мнению, на значения G оказывает влияние геомагнитное поле Земли и степень близости измерительных лабораторий к магнитному полюсу Земли.

Они составили модель, приведенную на рис. 100, в соответствии с которой по мере приближения к магнитному полюсу Земли увеличиваются значения гравитационной постоянной.

На рис. 100 показана схема, составленная J.-P. Mbelek и M. Lachieze-Rey, показывающая распределение широтных поясов с одинаковыми значениями G .

Как видно из рис. 100, по мере удаления от экватора и приближения к северному полюсу значения G увеличиваются. Ниже приводится табл. 23 с указанием координат пунктов измерения и измеренных значений G .

В то же время, построенные нами графики по данным табл. 23, взятой из статьи J.P. Mbelek и M. Lachieze-Rey (2002), не подтвердили выводов, сделанных авторами статьи о существовании статистически достоверной зависимости G от широты и долготы расположения лабораторий.

SEVRES, FRANCE; 48° 8' W 7° 11' E		Possible values of G (x 10 ⁻³)
EQUATOR	6.6710	Sevres
	6.6740	
	6.6710	Wuhan
	6.6680	

Рис. 100. Схема, иллюстрирующая зависимость G от широты и долготы местности (Mbelek, Lachize-Rey, 2002)

При построении графиков в тех пунктах измерения, где приведены несколько значений G , брались за основу средние значения G .

На рис. 101 показан график зависимости G от широты размещения лаборато-

Как видно из графика рис. 101, прямолинейный тренд однозначно указывает на то, что измеренные значения G в данном случае не зависят от широты местности измерений. Незначительный угол наклона тренда находится в пределах ошибки.

Более того, если даже взять за основу артефакты - наибольшее значение $G=(6,6912\pm 0,0006)$, полученное в Брауншвейге (РТВ), и наименьшее значение $G=(6,67\pm 0,008)$, полученное в Будапеште - то они находятся примерно на близких широтах, соответственно $47^{\circ}5'$ и $52^{\circ}28'$ северной широты. При этом среднеквадратичная ошибка $R^2=0,0045$. Рассматривая зависимость между долготой и измеренными значениями G , мы приходим к аналогичному выводу.

Так, на рис. 102 показан прямолинейный тренд, отражающий зависимость значений G от долготы местности измерений. Несмотря на то, что тренд имеет незначительный наклон, находящийся в пределах погрешности, разброс значений G указывает на отсутствие статистически достоверной зависимости G от долготы местности измерений. Наименьшие значения G , полученные в Будапеште $(6,67\pm 0,008)$, и наибольшее значение G $(6,6912\pm 0,0006)$, полученное в Брауншвейге (РТВ) находятся, соответственно, на восточной долготе, $19^{\circ}07'$ и $10^{\circ}53'$.

Среднеквадратичная ошибка при построении тренда составила $R^2=0,0442$.

Таким образом, проведенный анализ показал отсутствие существования статистически достоверной зависимости измеренных значений G от широты и долготы размещения измерительных лабораторий.

В то же время, если обратить внимание на значения G , измеренные в Фрибурге в октябре, ноябре и декабре 1984 г. и феврале 1985 г., то можно заметить существенные вариации значений G , начиная с третьего знака после запятой. Этот факт свидетельствует о постоянной динамике в вариациях измеренных значений

Таблица 23

Координаты пунктов измерения гравитационной постоянной

Расположение (ссылка)	Широта	Долгота	$G_{lab}(10^{-10} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2})$
Нижнее Хатт (МСЛ)	-41,2	174,9	$6,6742 \pm 0,0007$ $6,6746 \pm 0,0010$ (Сред. 6,6744)
Вухан (Хает)	30,6	106,88	$6,6699 \pm 0,0007$
Лос Аламос	35,88	-106,38	$6,6740 \pm 0,0007$
Гайсербург (НБС)	38,9	-77,02	$6,6726 \pm 0,0005$ $6,6720 \pm 0,0041$ (Сред. 6,6723)
Булдер (Джила)	40	-105,27	$6,6873 \pm 0,0094$
Озеро Гигервальд	46,917	9,4	$6,669 \pm 0,005$ $6,678 \pm 0,007$ $6,6700 \pm 0,0054$ (Сред. 6,672)
Цюрих	47,4	8,53	$6,6754 \pm 0,0005 \pm 0,0015$ $6,6749 \pm 0,0014$ (Сред. 6,6752)
Будапешт	47,5	19,07	$6,670 \pm 0,008$
Сиэтл	47,63	-122,33	$6,67421510,000092$
Севре (БИПМ)	48,8	2,13	$6,67559 \pm 0,00027$ $6,683 \pm 0,011$ (Сред. 6,6793)
Фрибург	46,8	7,15	$6,6704 \pm 0,0048$ (окт.84) $6,6735 \pm 0,0068$ (Ноя.84) $6,6740 \pm 0,0053$ (Дек.84) $6,6722 \pm 0,0051$ (Фев.85) (Сред. 6,6725)
Маньи-лез Хамо	49	2	$6,673 \pm 0,003$
Вупперталь	51,27	7,15	$6,6735 \pm 0,0011 \pm 0,0026$
Брауншвейг (РТВ)	52,28	10,53	$6,71540 \pm 0,00056$ $6,667 \pm 0,005$ (Сред. 6,6912)
Москва	55,1	38,85	$6,6729 \pm 0,0005$ $6,6745 \pm 0,0008$ (Сред. 6,6737)
Дай 3 Гринланд	65,19	-43,82	$6,6726 \pm 0,0027$
Озеро Бразимон	43,75	11,58	$6,688 \pm 0,011$

Результаты самых точных лабораторных измерений G , опубликованных за последние 60 лет, и размещение лабораторий по данным J.P. Mbelek и M. Lachieze-Rey (2002).

G . Несмотря на то, что, как отмечают J.P. Mbelek и M. Lachieze-Rey (2002), они не учли вариаций геомагнитного поля во времени, хотелось бы отметить, что вариации геомагнитного поля не имеют корреляции с вариациями измеренных значений G .

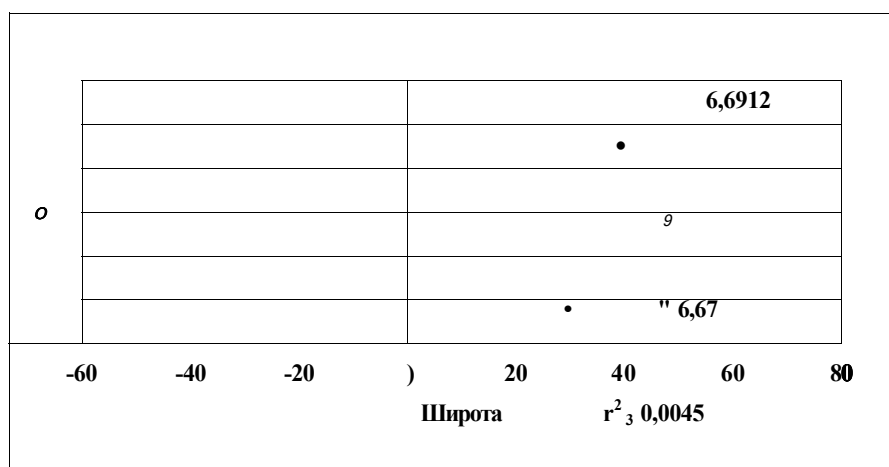


Рис. 101. График зависимости измеренных значений гравитационной постоянной от широты расположения измерительной станции

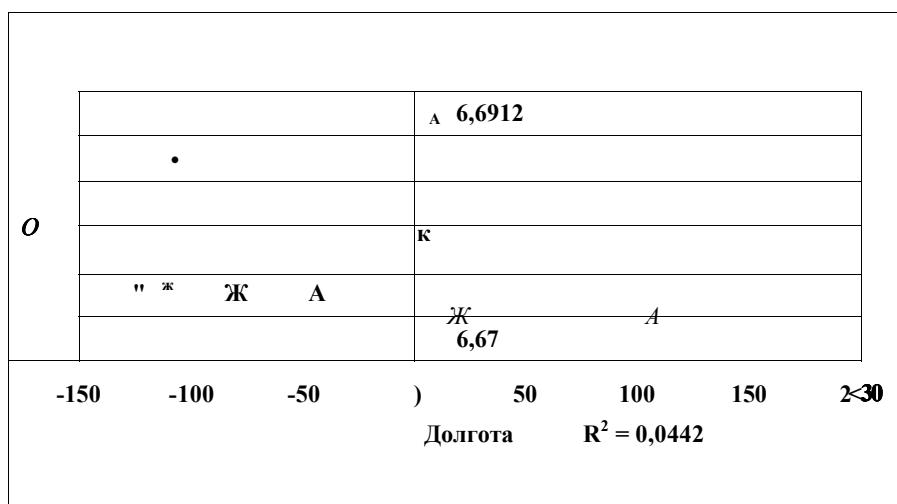


Рис.102. График зависимости измеренных значений гравитационной постоянной от долготы расположения измерительной станции

Имея факты существенных вариаций измеренных значений G во времени, вряд ли можно считать корректным сравнение между собой значений G , измеренных в разное время.

Если даже принять во внимание различие значений G , измеренных одновременно, то эти значения действительно должны зависеть от географического рас-

положения лабораторий, однако они будут постоянно изменяться из-за влияния проходящих через Землю сверхдлинных гравитационных волн.

Так, при прохождении гравитационной волны, как указывалось в предыдущих разделах, изменяется амплитуда возмущения метрики пространства h :

$$h \ll S \Delta L/L, \quad (4.28)$$

где h - амплитуда возмущения метрики пространства; ΔL - относительное смещение двух точек пространства в поле гравитационной волны; L - расстояние между точками пространства.

Следовательно, значение гравитационной постоянной G , измеренное на Земле с помощью весов Кавендиша в поле проходящей гравитационной волны, будет отличаться от истинного значения G . Величина и знак изменения измеренного значения гравитационной постоянной G под действием гравитационной волны зависит от амплитуды гравитационной волны и ориентации взаимодействующих масс по отношению к фронту проходящей волны.

4.5. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И ИХ ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА

Учитывая особую сложность и ответственность рассматриваемых вопросов, в настоящем разделе сделана попытка пройти вместе с читателем путь логического развития хода мысли авторов, что потребовало последовательного изложения ряда положений общей и частной теорий относительности и некоторых имеющих отношение к данной проблеме физических законов и принципов.

Впервые существование гравитационных волн было предсказано А.Эйнштейном в 1916 году в работах по общей теории относительности (Einstein, 1916).

Если подойти к проблеме упрощенно, можно прибегнуть к некоторой аналогии природы гравитационных волн с электромагнитными волнами. Как в свое время предсказал Максвелл и экспериментально подтвердил Герц, электрический заряд, совершая колебания в пространстве, испускает электромагнитные волны. А поскольку общая теория относительности является теорией поля, логично было бы предположить, что колеблющаяся масса должна вызывать волновые возмущения гравитационного поля, т.е. излучать гравитационные волны.

В соответствии с общей теорией относительности, свойства гравитационных волн по целому ряду характеристик отличаются от свойств электромагнитных волн. К примеру, гравитационные волны обладают значительно меньшей энергией, чем электромагнитные, принимая во внимание, что гравитационное взаимодействие существенно слабее электромагнитного.

Несмотря на то, что приоритет предсказания А. Эйнштейном гравитационных волн принято датировать 1916 годом, когда была опубликована первая его статья, описывающая гравитационные волны, в последующих его работах сообщается о некоторых допущенных ошибках при расчетах, которые исправляются в последующих работах. Так, в работе (Einstein, 1917) А. Эйнштейн пишет:

«Важный вопрос о том, как распространяются гравитационные волны, был рассмотрен мной уже полтора года назад в одной из моих работ (1916). Однако, поскольку изложение этого вопроса было недостаточно ясным и, кроме того, искажено досадной расчетной ошибкой, мы должны здесь вновь вернуться к его рассмотрению».

Таким образом, только к 1918 году представления А. Эйнштейна о гравитационных волнах можно считать окончательно сложившимися. Основопологающим является вывод А. Эйнштейна о скорости распространения гравитационных волн, приведенный в данной статье: «... *Из последних уравнений видно, что гравитационные волны распространяются со скоростью света*».

Говоря о равенстве скорости света и гравитационных волн и учитывая, что этим понятиям и принципам их измерения в последующих разделах будет уделено большое внимание, мы хотели бы несколько подробнее остановиться на этих вопросах.

Первая экспериментальная работа по определению скорости света в земных условиях была осуществлена Физо в 1849 г. В опытах Физо вычисленное значение скорости света составляло 314 858 000 м/сек (Физический энциклопедический словарь, 1983).

Согласно опытам Вебера и Кольрауша, $c=310\,740\,000$ м/сек. В последующем определение скорости света различными учеными постоянно уточняло это значение. Так, более точные опыты Фуко позволили получить значение скорости света $c = 298\,000\,000$ м/сек. Скорость света в пространстве, окружающем Землю, выведенная из коэффициента абберрации и из величины радиуса земной орбиты, равна $c = 308\,000\,000$ м/сек (Физический энциклопедический словарь, 1983).

Между тем, не все оказалось столь просто, как этого хотелось бы. В 1888 году Генрих Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн. После этих работ исследователей заинтересовал вопрос - одинакова ли скорость электромагнитных волн для различных диапазонов их длин волн? Юнг и Фобе, пытаясь усовершенствовать метод Физо, натолкнулись на ряд интересных фактов, которые навели их на мысль исследовать скорость распространения света разных длин волн. Проанализировав результаты опытов, они пришли к выводу, что синий свет распространяется в воздухе быстрее красного.

Рэлей в своем письме в журнал «Nature» писал по этому поводу (Филонович, 1983): «Опубликованный Юнгом и Фобсом результат, состоящий в том, что синий свет распространяется в вакууме со скоростью приблизительно на 1,8 % большей, чем красный свет, поднимает интересный вопрос о том, что в действительности определяется такого рода наблюдениями».

Между тем, объяснение этому явлению было дано в 1939 году ирландским физиком У.Р. Гамильтоном, а впоследствии и английским ученым Дж. Стоксом. Проблема сводится к тому, что при рассмотрении скорости света необходимо различать фазовую скорость света, которая отражает скорость перемещения фаз волны, и групповую скорость света, отражающая скорость движения максимума огибающей групп волн.

Форма огибающей групп волн дает общее представление о распределении электромагнитных волн в пространстве, а групповая скорость характеризует быстроту переноса энергии. Учитывая, что свет представляет собой группу волн различной длины, становится очевидным, что при экспериментальном измерении скорости света всегда определяется групповая скорость, что впервые в своих работах отметил Рэлей (Филонович, 1983).

По теории Максвелла, скорость распространения электромагнитных волн в среде равна:

$$V = c \sqrt{\xi \mu}, \quad (4.29)$$

где ξ - диэлектрическая проницаемость среды; μ - магнитная проницаемость среды; c - скорость света в вакууме.

Как видно из формулы, скорость электромагнитных волн в различных средах может меняться в зависимости от их электромагнитных свойств, и только в вакууме скорость света является константой.

В 1943 году Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси было получено уточненное значение скорости света в вакууме: $c=299\,500\,000\,680$ м/с.

Самые последние достижения в области определения скорости распространения гравитационных волн получены в начале 2003 года.

Так, в начале января 2003 года мировому научному сообществу были представлены результаты первого эксперимента по определению скорости распространения гравитационного взаимодействия, осуществленного в сентябре 2002 года. Авторы уникального исследования - Эд Фомалон (Ed Fomalont) из Национальной радиоастрономической обсерватории США в г.Шарлоттсвилль (штат Вирджиния) и Сергей Копейкин из университета Миссури. Одно из наиболее важных последствий полученного результата - ограничение возможного числа измерений, которыми обладает наше пространство (в ряде космологических теорий предполагается, что их число может превышать три). Кроме того, в очередной раз подтверждена теория относительности Эйнштейна.

Эксперимент был поставлен следующим образом. Поскольку непосредственно измерить скорость распространения гравитационных волн на сегодня считается невозможным, С.Копейкин, с помощью математического аппарата теории относительности, получил выражение, описывающее гравитационное поле движущегося тела через его массу, скорость движения и скорость распространения гравитационных волн. В результате оказалось возможным определить скорость

гравитации, измеряя гравитационное поле массивного небесного тела (планеты Юпитер), скорость орбитального движения которого и масса известны.

Возможность провести прямые измерения гравитационного поля планеты-гиганта представилась в сентябре 2002 года, когда состоялось покрытие Юпитером яркого квазара, являющегося источником радиоизлучения. Обработав результаты наблюдений покрытия, проводившихся с помощью нескольких радиотелескопов, Фомалон и Копейкин смогли измерить наблюдаемое смещение видимого положения источника под действием гравитационного поля Юпитера. Отсюда удалось определить скорость распространения гравитационного излучения. В данном эксперименте она оказалась равной 0,95 скорости света (возможная ошибка $\pm 0,25$ скорости света).

Нам хотелось бы завершить рассмотрение проблемы определения скорости гравитационных волн результатами этого прекрасно поставленного эксперимента, но история науки показывает, что результаты исследований подобного масштаба редко принимаются научным сообществом без «боя».

Ряд коллег Фомалона и Копейкина поставили полученные результаты под сомнение. Так, по мнению Клиффорда Уилла из Университета им. Джорджа Вашингтона в Сент-Луисе, Миссури, в своих расчетах Копейкин не принял во внимание дополнительные гравитационные эффекты, производимые движущимся небесным телом, таким, как Юпитер. Если учитывать эти параметры, то результат будет иным.

Сомнение в выбранной методике выразил и японский астрофизик Хидеки Асада. В 2002 году он опубликовал в *Astrophysical Journal Letters* статью, в которой показал, что метод, избранный Копейкиным и Фомалоном, позволяет измерить скорость света, а не гравитации.

Во всяком случае, только время может рассудить спор ученых.

Разобравшись со скоростью света, нельзя не остановиться на его природе, ибо в дальнейшем нам придется рассуждать о природе гравитационных волн и их отличии от электромагнитных излучений.

Ньютон показал, что белый свет является составным и содержит «чистые цвета», каждый из которых обладает своей преломляемостью. Ньютон объяснял преломляемость света различием в массе корпускул. По его мнению, корпускулы фиолетового цвета, обладая наименьшей массой, сильнее втягиваются в среду, летят в ней с большей скоростью и сильнее преломляются, по сравнению с корпускулами красного цвета, обладающими большей массой. Для промежуточных цветов массы корпускул имеют промежуточные значения, в результате чего при преломлении они располагаются между красным и фиолетовым цветами.

Наряду с корпускулярной концепцией Декарта-Ньютона в XVII веке возникла и развивалась противоположная, волновая теория Гука-Гюйгенса. В «Трактате о свете», представленном Парижской Академии в 1678 г. и опубликованном в 1690 г., Гюйгенс исходит из представления о том, что свет есть процесс распространения продольных деформаций в некоторой материальной среде, пронизы-

вающей все тела, - мировом эфире. Развитие корпускулярной и волновой теорий света происходило с переменным успехом то одной, то другой. Так, в 1662 г. Бартолинус обнаруживает двойное лучепреломление. Изучая это явление, Гюйгенс открывает поляризацию света, но не может дать правильного ее объяснения с волновой точки зрения. В то же время, в 1717 г. Ньютон показывает, что поляризация света может быть объяснена при предположении поперечности световых волн, что послужило для того времени аргументом против волновой теории. Таким образом, огромный авторитет Ньютона привел к тому, что весь XVIII век признавалась только корпускулярная теория света.

В 1801 году Юнг устанавливает принцип интерференции, на основании чего объясняет окраску тонких пленок вещества. С этой работы начинается триумф волновой теории света. М.Планк выдвинул гипотезу, что энергия испускается и поглощается не непрерывно, а отдельными квантами. Энергия каждого кванта равна: $\epsilon = h\nu$, где h - постоянная Планка, ν - частота.

Исходя из гипотезы Планка, масса покоя фотона равна нулю. Квант электромагнитного излучения существует только, распространяясь со скоростью света.

Таким образом, изучая свойства света, исследователи сначала пришли к выводу, что свет представляет собой корпускулы, а затем - волны. Электромагнитная (волновая) теория света хорошо объясняет интерференцию, дифракцию, поляризацию и ряд других явлений. В то же время, волновая теория света не могла объяснить фотоэффект и эффект Комптона. Поэтому было высказано предположение, что световые фотоны, наряду с волновыми, обладают еще и корпускулярными свойствами, хотя масса покоя фотонов равна нулю. Каждый фотон ведет себя одновременно как частица (корпускула) и как волна. Дальнейшее развитие обоих направлений привело к формированию взглядов о корпускулярно-волновой природе света или корпускулярно-волнового дуализма.

Таким образом, говоря об одном из параметров гравитационных волн - их скорости, которая, по А.Эйнштейну, равна скорости света, а также о природе гравитационных волн, мы коротко остановились на проблеме определения скорости света и изучении его природы.

Возвращаясь к понятию гравитационных волн, нам хотелось бы еще раз обратить внимание на их некоторую аналогию с электромагнитными волнами. В электродинамике Максвелла, как уже отмечалось, переменное движение электрического заряда приводит к излучению электромагнитной волны. Тот же результат содержится в одном из решений уравнений Эйнштейна: переменное движение массы приводит к излучению гравитационной волны. В обоих случаях мощность излучения пропорциональна квадрату заряда (массы). Учитывая, что, по сравнению с электромагнитным, гравитационное взаимодействие значительно слабее, что обусловлено ничтожно малым значением коэффициента пропорциональности (гравитационной постоянной G), стоящего перед квадратом массы, эффективность гравитационного излучения чрезвычайно мала.

Внося существенные коррективы в свои предыдущие работы по гравитационным волнам, А.Эйнштейн (Einstein, 1918) отмечает; *«Этот результат, в противоположность результату прежней работы, содержащей ошибку в вычислениях, показывает, что механическая система, постоянно сохраняющая сферическую симметрию, не может излучать. Из формулы видно, что интенсивность излучения ни в одном направлении не может стать отрицательной, тем более не может быть отрицательной и полная интенсивность излучения. Уже в прежней работе подчеркивалось, что окончательный результат, согласно которому должна происходить потеря энергии телами вследствие теплового возбуждения, вызывает сомнение во всеобщей справедливости теории. Нам кажется, что построение усовершенствованной квантовой теории должно повлечь за собой и видоизменение теории тяготения».*

В настоящей работе мы не будем останавливаться на изложении основных положений общей теории относительности, прекрасно описанной как в работах самого автора, так и в многочисленных изданиях. Нам представляется наиболее важным акцентировать внимание на отдельных аспектах, вытекающих из этой теории и ряда других работ, имеющих прямое или косвенное отношение к рассматриваемым проблемам.

В своей работе «Единая теория гравитации и электричества», опубликованной совместно с В. Майером в 1931 г. (Einstein, Mayer, 1931), А. Эйнштейн отмечает следующее:

«До сих пор общая теория относительности была, в первую очередь, рациональной теорией гравитации и метрических свойств пространства. При рассмотрении же электромагнитных явлений она должна довольствоваться лишь формальным присоединением максвелловской теории к релятивной схеме».

В своей статье, посвященной единой теории гравитации и электричества, А. Эйнштейн и В. Майер отмечают следующее:

«Благодаря введению 5 векторов в четырехмерном пространстве возникает пространственная структура, естественно ведущая к единой теории гравитации и электричества. Получаемые при этом уравнения электромагнитного поля совпадают с записанными в релятивистской форме уравнениями Максвелла для пустого пространства. Эти уравнения не допускают отличных от нуля плотностей электрического заряда и тока; поэтому они не пригодны внутри электрических корпускул. В такой теории электрические корпускулы могут фигурировать только как сингулярности поля. Однако, по-нашему мнению, удовлетворительная теория поля должна избегать введения сингулярностей при описании полного поля, т.е. должна включать в себя и поля внутри корпускул.

Поэтому мы поставили вопрос, не допускает ли рассмотренная нами пространственная структура обобщения, приводящего к уравнениям электромагнитного поля с отличной от нуля плотностью электрического заряда.

Единственное изменение по сравнению с ранее рассмотренной пространственной структурой состоит в том, что отпадает гипотеза (II). Оказывает-

ся, что установление совместных уравнений поля для пространственной структуры связано с четырехмерностью континуума».

Нам хотелось бы более детально остановиться на единстве и различиях электромагнитных и гравитационных взаимодействий при попытках создать единую теорию поля.

Необходимо отметить, что, кроме количественной причины сравнительно малой эффективности гравитационных волн, существует еще один важный отличительный фактор — это качественное различие электромагнитного и гравитационного взаимодействий. Так, если в электродинамике имеются электрические заряды двух знаков (электроны и протоны), и отношение электрического заряда к массе может быть различным даже в случае, когда тела заряжены одноименно (разница может быть в избытке или недостатке электронов), то в гравитации все заряды (гравитационные массы) имеют одинаковый знак (притяжение), и одинаково отношение гравитационных зарядов к инертным массам. Последнее утверждение является принципом эквивалентности общей теории относительности (ОТО).

Таким образом, чтобы приблизиться к пониманию природы гравитационных волн, как становится ясно, необходимо воспользоваться единой теорией поля, основа которой была заложена в работах А. Эйнштейна и В. Майера. Как известно, слабое и сильное ядерные и электромагнитные взаимодействия - по отдельности или на основе общей теории - описываются с помощью квантовых уравнений поля, объединяющих в себе принципы частной теории относительности и квантовой механики. В частной теории относительности устанавливается эквивалентность массы и энергии, а в квантовой механике - концепция дискретности энергии и принцип неопределенности. В современных квантовых теориях поля силы рассматриваются как результат обмена некими частицами между взаимодействующими частицами. Обменные частицы называют «виртуальными», так как их невозможно наблюдать и их существование слишком кратковременно. Например, в электромагнитном взаимодействии, если сближаются два электрона, то они обмениваются частицей - фотоном, в результате чего происходит их отталкивание. Процессы такого рода прекрасно описываются с помощью диаграмм Фейнмана (Фейнман, 1988).

Виртуальный, обменный фотон существует в соответствии с принципом неопределенности, согласно которому неопределенность энергии микросистемы обратно пропорциональна интересующему нас интервалу времени (в данном случае времени взаимодействия). Следовательно, квантовая механика допускает, что на очень короткое время частица данной энергии может материализоваться, и чем больше энергия такой виртуальной частицы, тем короче время ее существования. При этом дальнедействующие силы, например электромагнитные, передаются только с помощью не имеющих масс виртуальных частиц, так как только такие частицы могут существовать достаточно долго, чтобы обеспечивать взаимодействие на больших расстояниях. В то же время короткодействующие

силы (слабое и сильное ядерное взаимодействия) передаются путем обмена виртуальными частицами с ненулевой массой покоя. Обладая высокими энергиями, они имеют очень короткое время жизни, в силу чего не могут участвовать во взаимодействиях на больших расстояниях. Таким образом, силу электромагнитного взаимодействия переносит фотон. Что касается слабого взаимодействия, то оно переносится промежуточным векторным **бозоном**. Считается, что существуют три типа таких частиц: положительно заряженная, отрицательно заряженная и нейтральная. Бозон подобен фотону, но имеет конечную массу покоя. Сильное взаимодействие между ядерными частицами осуществляется посредством **мезонов**. Однако это взаимодействие считается проявлением более фундаментальной силы, которая удерживает вместе группы **кварков**, образующих такие частицы, как протоны, нейтроны и мезоны; носителем взаимодействия в этом последнем случае является **глюон**.

Предполагается, что подобным же образом осуществляются гравитационные взаимодействия, при этом гравитационные силы передаются посредством особых частиц, не имеющих массы - **гравитонов** (Берестецкий, 1979).

Основной различительной характеристикой элементарных частиц различных семейств является спин, который можно представить как результат вращения частиц вокруг своей оси. У электронов, протонов и нейтронов спин равен $1/2$, а у частиц, не имеющих массы, как, например фотон, спин равен 1. Следовательно, все обменные частицы слабого, сильного и электромагнитного взаимодействия имеют спин, равный 1, поэтому одинаковые частицы отталкиваются (например, два электрона), а частицы с противоположными зарядами притягиваются (например, электрон и протон). Считается, что гравитон имеет спин, равный 2, так как все взаимодействия с обменом частицами, имеющими спин, равный 2, характеризуются только притяжением.

В 1976 году Д.А. Фридманом, П. Ван Нивенхейзенем и С. Феррарой, а также независимо от них С. Дезером и Б. Зумино, была разработана теория супергравитации. В этой теории рассматривается единственный вид частицы - суперчастицы. Эта частица может выступать как любая частица, переносящая взаимодействие, в том числе как кварк или лептон («легкая» частица, например электрон), связывая, таким образом, гравитацию со всеми остальными взаимодействиями и частицами. Используя данный подход, появляется возможность построить теорию гравитации, основываясь на понятии гравитона, обладающего спином 2, при этом частицы вещества взаимодействуют, обмениваясь гравитонами, в соответствии с уравнениями общей теории относительности Эйнштейна.

В этом случае дальнедействующая сила тяготения является результатом обмена гравитонами. Теория супергравитации предполагает существование также массивных частиц со спином $3/2$ - **гравитино**.

Между тем теория супергравитации пока не способна объяснить все многообразие реально существующих частиц, как и разнообразие их масс, и, скорее всего, она не в силах справиться с этой задачей.

Как известно из общей теории относительности А. Эйнштейна, гравитационная волна, проходя через тела, вызывает квадрупольное изменение их формы. Следовательно, при прохождении через любое тело гравитационная волна сначала несколько вытянет его по направлению своего движения, одновременно сужив перпендикулярно ему. Затем, наоборот, сожмет по направлению движения и расширит перпендикулярно ему. Это одно из специфических свойств гравитационного излучения, отличающее его от электромагнитного, акустического и сейсмического.

Итак, гравитационные волны излучаются при неравномерном движении масс и были впервые предсказаны А. Эйнштейном в 1916 г, а в 1918 г. он рассчитал их интенсивность.

В 1935 г. советский физик М.П. Бронштейн ввел понятие квантов гравитационного поля - гравитонов и разработал квантовую теорию гравитации.

Академик В.А. Фок (1948) был первым, кто обратил внимание на возможность использования астрофизических катастроф как источника мощного гравитационного излучения. Согласно современным расчетам, при слиянии двух нейтронных звезд излучается около 10^{45} Дж в виде всплеска гравитационного излучения, то есть около 1% от полной энергии ($E=mc^2$) двух звезд (Николсон, 1983).

В 70-е годы советский астрофизик Л.П. Гришук математически доказал, что гравитационные волны могут существовать и в однородной среде, то есть Вселенную наполняют реликтовые гравитационные волны, рожденные в самом начале образования Вселенной.

Рассел А. Хальс и Джозеф Х. Тейлор открыли гравитационные волны (длина волны около 300 км) при изучении двойного радиопульсара (открытого ими в 1974 г.) PSR 1913+16.

В 1979 г. детальное исследование пульсара с помощью 300-метрового радиотелескопа в Аресибо (Пуэрто-Рико) показало, что орбитальный период системы уменьшается с относительной скоростью порядка $3 \cdot 10^{-12}$. Если основываться на общей теории относительности, то причина этого заключается в излучении гравитационных волн (Нарликар, 1985).

Тейлор, Фаулер и Мак-Каллог провели наблюдения радиопульсара PSR 1913+16 в радиодиапазоне и не только зарегистрировали уменьшение его орбитального периода, но и смогли измерить другие параметры орбит двойной системы. Это позволило количественно оценить потери энергии на гравитационное излучение и вычислить, с какой скоростью должен уменьшаться орбитальный период.

Последняя оценка очень хорошо согласуется с наблюдаемым значением. Несмотря на то, что проведенные наблюдения не позволили прямо и окончательно установить существование гравитационных волн, тем не менее, аргументы в пользу этого довольно убедительны. Во всяком случае, до сих пор не удалось предложить какое-либо другое удовлетворительное объяснение периода пульсара. Если интерпретация результатов наблюдений, предложенная Тейлором и его

коллегами, верна, то это можно считать первой косвенной регистрацией гравитационного излучения (Нарликар, 1985).

У пульсара в двойной системе проявляются два других специфических эффекта, объясняемые общей теорией относительности. Один из них - прецессия перигелия орбиты. Наблюдаемая прецессия орбиты пульсара PSR 1913+16 составляет 4,23 угловых градуса в год, что в 36 000 раз превышает эффект для Меркурия! В рассматриваемом случае прецессия не может быть вызвана приливным влиянием одной звезды на другую, так как, по-видимому, обе звезды представляют собой компактные нейтронные звезды, для которых приливный эффект пренебрежимо мал. Пренебрегая приливным взаимодействием, удастся объяснить прецессию целиком в рамках общей теории относительности, если верно, что масса каждой из звезд равна $1,4 M^{\odot}$.

Второй эффект связан с прецессией оси вращения пульсара, которая вызвана так называемым спинорбитальным взаимодействием. Спинорбитальное взаимодействие проявляется в том, что на вращающееся тело, которое, кроме того, движется как целое по замкнутой орбите вокруг другого тела, действуют силы, вызывающие прецессию собственной оси вращения (если не было орбитального движения, то не было бы и прецессии собственной оси вращения). Если вращающееся тело - пульсар, то из-за прецессии форма принимаемого от него импульса излучения должна меняться. Оценки показывают, что скорость прецессии должна составлять порядка 1° в год, и это должно проявиться в медленном изменении среднего профиля импульса пульсара, входящего в двойную систему.

Сверхновые, по-видимому, могут излучать гравитационные волны, если только при взрыве заметны отклонения от сферической симметрии. При типичном взрыве мощность в импульсе длительностью в доли секунды может составить около 10^{47} Вт. Гравитационные волны могут возникнуть при аккреции вещества на черную дыру и при столкновении черных дыр.

Но, чтобы создать детектор, способный непосредственно зарегистрировать гравитационные волны такой мощности, необходим резкий скачок в развитии техники измерений. Гравитационная волна, проходя в пространстве, на мгновение искривляет его. В детекторах гравитационных волн необходимо зарегистрировать влияние этого эффекта на движение механических систем чувствительного датчика детектора. Трудность состоит в создании сверхчувствительных систем, способных фиксировать столь малые изменения (Narlikar, 1974). Ниже приводится табл. 24 с указанием характеристик гравитационного излучения от возможных источников (Narlikar, 1974, Сажин и др., 1996).

В работе М.И. Зельникова и В.Ф. Муханова (1991) рассмотрено гравитационное излучение, возникающее при образовании протонейтронной звезды. При этом внутри звезды развиваются в основном крупномасштабные неоднородности. Профиль энтропии и плотности таких неоднородностей формируют фигуру, похожую на «гриб» ядерного взрыва. Пузырь горячей нейтронной материи всплывает к поверхности звезды, подобно «грибу» взрыва в земной атмосфере.

Таблица 24

**Характеристики гравитационного излучения от возможных источников
(Narlikar, 1974, Сажин и др., 1996)**

Источник	Типичная частота, Гц	Возможная частота события
Звездный коллапс: сверхновая, образование черной дыры (в нашей Галактике)	$10^2 - 10^5$	1 в 30 лет
В скоплении галактик в созвездии Девы	$10^2 - 10^5$	Примерно 10 в год
Процессы, связанные с черными дырами: черные дыры с массой $10^2 - 10^4 M_{\odot}$ в шаровых скоплениях	$1 - 10^2$	До 1 в месяц
Ядра галактик: черные дыры с массой $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$	$\mu - 10^{-2}$	До 50 в год
Двойные звезды: в нашей Галактике	$10^{-5} - 10^{-2}$	Непрерывно
Особый пример, Йота Волопаса	$8,6 \cdot 10^{-5}$	Непрерывно

Количество таких пузырей, всплывающих одновременно, меняется от шести до двух, в зависимости от симметрии рассматриваемой картины. Характерные массы таких пузырей составляют $0,01 M_{\odot}$, а скорости радиального движения достигают $\sim 0,1$ с. При одном цикле всплывания пузырей излучаемая в виде гравитационных волн энергия составляет $\sim 10^{-2} M_{\odot} c^2 - 10^{-10} M_{\odot} c^2$. Такие циклы во время остывания нейтронной звезды повторяются неоднократно. Эта фаза может длиться вплоть до секунды. Полная энергия, высвечивающаяся в виде гравитационного излучения, может достигать $10^{-1} M_{\odot} c^2$.

Теоретические разработки и расчеты возможных излучений гравитационных волн различными объектами, сделанные разными методами, наблюдения волновых эффектов и физических свойств, приводят исследователей порой к противоречивым результатам. Как указывает Р. Сакс (1966): «В настоящее время мы понимаем три основные особенности гравитационного излучения. Во-первых, мы можем описать излучение на больших расстояниях от источников в асимптотической плоской Вселенной; это описание геометрически изящно и достаточно детально для того, чтобы проанализировать все мысленные эксперименты, касающиеся поведения пробных частиц или пробных поглотителей в асимптотическом поле (волновой зоне). Во-вторых, мы понимаем в принципе, более или менее, как в точной теории связаны поля на больших расстояниях от источников с полями на близких расстояниях и с самими источниками или полями негравитационного происхождения. В-третьих, мы имеем приближенные методы, позволяющие

получать фактические численные количества излучения, испускаемого в той или иной конкретной ситуации, или сечения рассеяния и т.д. Эти приближенные методы антигеометричны, или в лучшем случае негеометричны, и поэтому довольно непопулярны; у них, конечно, есть довольно уродливые черты, но, быть может, стоит не забывать, что если какой-нибудь упрямый экспериментатор возьмется и получит определенный результат, то нам, несомненно, придется обратиться к приближенным методам, чтобы сравнить его с теорией».

В.Б. Брагинский (1965) составил интересный обзор возможностей обнаружения гравитационных волн от внеземных источников (двойные звезды, тормозное гравитационное излучение при кулоновском рассеянии электронов) и от земных источников (вращающиеся стержни, механические колебания, ядерные взрывы и т.д.). Для ряда двойных звезд, относительно близко расположенных к Солнечной системе, имеются интересные данные о потерях энергии на гравитационное излучение. Особый интерес представляет звезда WZ созвездия Стрелы. Эта звезда имеет большую частоту обращения. Интегральный поток мощности в таком случае может превосходить мощность видимого излучения. Земные приемники гравитационного излучения двойных звезд должны регистрировать потоки порядка Ю-⁻¹- Ю-⁻¹⁰ эрг 3 сек⁻¹.

Довольно многозначительным образом выясняется, что среди двойных звезд нет объектов с относительно большими массами (в несколько раз больше солнечной) и с малыми периодами обращения. По мнению Д. Иваненко (1966), это может свидетельствовать о том, что сравнительно интенсивное гравитационное излучение подобных звезд сделало невозможным их длительное существование. При коллапсе двойной нейтронной звезды энергия гравитационных волн может достигнуть 10⁵⁰ эрг (Сакс, 1966).

Общий вывод Д. Иваненко говорит в пользу желательности исследования прежде всего внеземных источников гравитационных волн, однако запретов для конструирования земных генераторов излучения также нет. Существенный прогресс может быть достигнут благодаря статистическим методам выделения слабых сигналов на фоне шумов за большие промежутки времени. Конечно, сейчас пока невозможно говорить о регистрации квантовых процессов, связанных с гравитонами (Иваненко, Фролов, 1984).

В работе (Zakharov, Sazhin, 2000) рассчитана частота образования и эволюция двойных черных дыр в различных моделях образования черных дыр. Показано, что небольшая добавочная скорость (30-50 км/с) при образовании черной дыры в ходе коллапса делает орбиту сильно вытянутой, при этом время до слияния из-за гравитационного излучения сильно сокращается. С учетом этого эффекта темп регистрации слияний двойных черных дыр гравитационно-волновыми интерферометрами первого поколения оказывается равным 10-30 событий в год, несмотря на редкость образования двойных черных дыр в Галактике. В.Н. Руденко (Rudenko, 2000) обсуждается новый алгоритм обработки гравитационных

данных при поиске «астрогравитационной» корреляции. В качестве проверки эффективности нового алгоритма, проводится реанализ данных, относящийся к эффекту «гравитационно-нейтринной» корреляции в период вспышки сверхновой SN 1987A.

В работе А.Ф. Захарова и М.В. Сажина (Zakharov, Sazhin, 2000) рассматривается действие гравитационных линз, как природных усилителей гравитационного излучения, которые демонстрируют существенное усиление детекторов для VIRGO (LIGO) и LISA соответственно. Оценена вероятность большого усиления гравитационных волн двойными гравитационными линзами.

В.Б. Брагинский и В.С. Назаренко (1972) указывают, что максимум мощности гравитационного излучения двойных звезд приходится на моменты времени, близкие к коллапсу. При этом частота излучения меняется настолько быстро, что при регистрации этого излучения узкополосным резонансным детектором в его полосу пропускания попадают лишь несколько циклов колебаний. Поэтому желательно было бы использовать либо широкополосный детектор с перестраиваемым узкополосным фильтром на выходе, либо узкополосный детектор с перестраиваемой резонансной частотой. Детектор гетеродинного типа принципиально может удовлетворить этому требованию.

Удивительно красивое описание гравитационных волн дал выдающийся американский физик Кип Торн во время вручения ему диплома иностранного члена Российской Академии Наук в декабре 2000 года (Кип Торн является крупнейшим ученым в области релятивистской астрофизики, теории гравитационных антенн, квантовых измерений и т.д.): «Гравитационные волны - это рябь на поверхности кривизны, на ткани пространства-времени, которая распространяется со скоростью света...».

Большая роль в развитии совершенно нового научного направления астрофизики и фундаментальной физики - детектирования гравитационных волн, наряду с Кип Торном, принадлежит выдающимся российским ученым В.И. Пустовойту и М.Е. Герценштейну (1962), предложившим принцип использования пары свободных масс-зеркал и лазерного интерферометра для регистрации их малых колебаний, вызванных гравитационной волной.

Этот принцип впоследствии лег в основу сконструированных в США гравитационно-волновых детекторов.

Гравитационная волна растягивает и сжимает пространство. Если в ее поле есть две разнесенные системы координат, то волна вызывает их относительное колебательное движение. У гравитационной волны возможны две поляризации. В первой волна в течение полупериода сжимается по вертикали и растягивается по горизонтали, в следующий полупериод - наоборот. Вторая возможная поляризация сдвинута на 45° по отношению к первой. Во времени гравитационная волна - это длинный или короткий волновой пакет. В его форме заключена информация об источнике (Торн, 2001).

4.6. ВОЗМОЖНОСТЬ ВЛИЯНИЯ СВЕРХДЛИННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

4.6.1. Гравитационные волны и квадрупольная деформация Земли

Как уже было отмечено выше, прохождение сверхдлинных гравитационных волн через Землю должно вызывать квадрупольную деформацию ее формы. Естественно, что подобная деформация должна найти свое отражение в различных геодинамических и метеорологических процессах, в частности, в изменениях тектонической активности Земли и динамических процессов в атмосфере и гидросфере, особенностях вариаций угловой скорости вращения Земли. Между тем существует прямой метод, позволяющий непосредственно зафиксировать деформации формы Земли, если они действительно наблюдаются. Таким методом является лазерная дальнометрия с помощью искусственных спутников Земли. Ниже приводится описание данной методики и некоторых результатов измерений, полученных с ее помощью.

4.6.2. Космическая геодезическая программа NASA. Лазерная дальнометрия со спутника

В лазерной дальнометрии со спутников (ЛДС) глобальная сеть станций измеряет мгновенное время ультракоротких импульсов света, излучаемых от поверхности Земли до спутников и отраженных обратно, с помощью установленных на них специальных рефлекторов. Это обеспечивает мгновенное измерение расстояния до уровня миллиметровой точности. Данная информация накапливается в базах данных для точного определения орбит спутников и различных научных исследований.

Лазерная дальнометрия со спутников (ЛДС) является геодезической методикой с доказанной эффективностью и используется для научных исследований системы Земля-Атмосфера-Океаны:

- ЛДС является самой точной на сегодня методикой для определения параметров геоцентрической системы Спутник-Земля, позволяющей проводить точную калибровку радарных замеров и отделять долгосрочное смещение аппаратуры от вековых изменений в топографии океана;
- способность ЛДС измерять временные вариации в гравитационном поле Земли и контролировать движение сети станций с учетом геоцентра, вместе со способностью контролировать вертикальное движение в абсолютной системе ко-

ординат, делает эту методку незаменимой для высокоточных исследований ряда земных и космических процессов;

- уникальные возможности ЛДС делают эту технологию незаменимой для моделирования и оценки долгосрочного изменения климата посредством обеспечения системы отсчета для постледникового скачка, изменений уровня Мирового океана и объема таяния льда;

- ЛДС дает возможность определения временного перераспределения массы твердой Земли, океана и атмосферы;

- технология ЛДС позволяет контролировать реакцию атмосферы на временные вариации Солнечной постоянной;

- ЛДС обладает уникальной способностью проверки основных положений Общей Теории Относительности;

- станции ЛДС образуют важную часть международной сети космических геодезических обсерваторий, которые содержат системы VLBI, GPS, DORIS и PRARE;

- при некоторых критических событиях, когда отказали другие радиометрические системы слежения, ЛДС предоставило безотказную избыточную информацию.

Вклад ЛДС в науки о Земле

Лазерная дальнометрия с помощью околоземных спутников берет свое начало с запуска спутника Бекон-Б, осуществленного NASA в 1964 г. После этого точность по измерению дальности, продиктованная требованиями науки, повысилась от нескольких метров до нескольких миллиметров.

В течение последних трех десятилетий глобальная сеть лазерной дальнометрии со спутника (ЛДС) превратилась в мощный источник данных для исследования твердой Земли и ее океанических и атмосферных систем. В дополнение, ЛДС обеспечивает точным определением параметров орбиты для полетов бортового радарного альтиметра с нанесением на карту поверхности океана (которые используются для моделирования глобальной циркуляции океана), для нанесения объемных изменений в континентальной массе льда и для топографии Земли. Она также обеспечивает данными для субнаносекундного глобального перевода времени и для проведения специальных тестов Общей Теории Относительности.

ЛДС помогает при изучении системы

Твердая Земля - Атмосфера - Гидросфера - Криосфера

Более 30 лет получения данных ЛДС позволили создать эталонную модель стандартного высокоточного длинноволнового гравитационного поля, которая

поддерживает определение всех параметров точности орбиты и создает основу для изучения временных гравитационных вариаций из-за перераспределения массы. Высота геоида с помощью ЛДС была определена с точностью до 10 сантиметров на длинных волнах.

Для измерения временных изменений в гравитационном поле ЛДС измеряет эффекты перераспределения массы в общей системе Земли. Десятилетия получения ежемесячных величин, определенных с помощью ЛДС, второй зональной гармоникой гравитационного поля Земли, обеспечивает независимую проверку перераспределения массы, подразумеваемую моделями глобальной атмосферной циркуляции, используемыми для предсказания глобального изменения климата. ЛДС помогает при прямом считывании поверхностных поднятий.

Спутниковые альтиметры применялись для вычисления равноприливной карты основного лунного прилива M2.

Топография (и ее изменения) в ледяном покрове Земли наносятся на карту с использованием спутниковых альтиметров и орбит с высокой точностью, с помощью моделей силы тяжести, составленных на основе данных ЛДС.

ЛДС измеряет долгосрочную динамику твердой Земли, океанов и атмосферы.

Определения с помощью ЛДС скорости вращения Земли и ее ориентации позволяют оценить изменения в распределении масс и изменениях углового момента в общей системе Земли.

ЛДС помогает в изучении тектонических движений

ЛДС предоставляет точные значения (мм/год) параметров движения спутника в геоцентрической системе отсчета в глобальном масштабе. В совокупности с гравитационными моделями и данными по изменениям параметров вращения Земли в течение нескольких десятилетий, эти результаты вносят неоценимый вклад в моделирование конвекции в мантии Земли.

ЛДС помогает в изучении фундаментальной физики

Измерения с помощью ЛДС позволили перепроверить ряд основных физических принципов, исходящих из Общей Теории Относительности. Измерения ЛДС LAGEOS 1 и 2 зафиксировали линзовое перетаскивание системы отсчета. Третий тип спутника LAGEOS был предложен для изучения частной теории относительности.

Измерения ЛДС LAGEOS обеспечили наиболее точные измерения гравитационной константы и массы Земли и подтвердили, что она не меняется в вековом режиме.

Скорости смещений между станциями ЛДС на стабильных внутриплитных частях помогли подтвердить модель тектоники плит с учетом палеомагнитной временной шкалы.

Система ЛДС стабильно совершенствуется

Результаты данных ЛДС улучшаются с помощью:

- Совершенствования системы обработки данных в реальном масштабе времени;
- Обновления программно-аппаратного комплекса системы;
- Введения дополнительных операций;
- Введения дополнительных спутников;

Информационная система данных динамики земной коры (ИСДДЗК), расположенная в GSFC NASA, является основной базой хранения данных глобальной космической геодезии, которые также имеются в Европейском центре данных в Германии.

Сравнительно недавно с помощью ЛДС были выявлены большие изменения в сплюсненности Земли, начавшиеся в 1998 г.

4.6.3. Особенности квадрупольной деформации Земли по данным космической лазерной дальнометрии

Кристофер Кокс и Вениамин Чао (Cox, Chao, 2002) опубликовали в журнале Science статью, в которой сообщается о новом и совершенно неожиданном результате, касающемся вариаций в гравитационном поле Земли. Они использовали данные спутниковой лазерной дальнометрии в течение последних 25 лет для определения долгосрочных вариаций в зональном коэффициенте сферической гармоник Земли второй степени, так называемого коэффициента J_2 . Коэффициент J_2 отражает динамику соотношения экваториального и полюсного радиусов Земли. В течение многих лет коэффициент J_2 уменьшался, как принято считать, из-за высвобождения талой воды из мантии со времен ледникового периода. Между тем новые данные показывают, что в действительности с 1998 г. J_2 начал увеличиваться.

Данные лазерной дальнометрии со спутника (ЛДС), приведенные на рис. 103, обозначают по истечении времени сдвиги в изменениях сплюсненности Земли.

При этом, если с 1980 г. и вплоть до 1997 г. величина коэффициента J_2 оставалась приблизительно постоянной при $-2,8 \cdot 10^{-10}$ в год, то очевидно, что, начиная с 1998 г., противоположное изменение $J_2(t)$ ускорилося в соответствии с каким-то непонятным механизмом.

По данным NASA, этот процесс отражает расширение Земли в экваторе и сплющивание в полюсах, так как это показано на рис. 103.

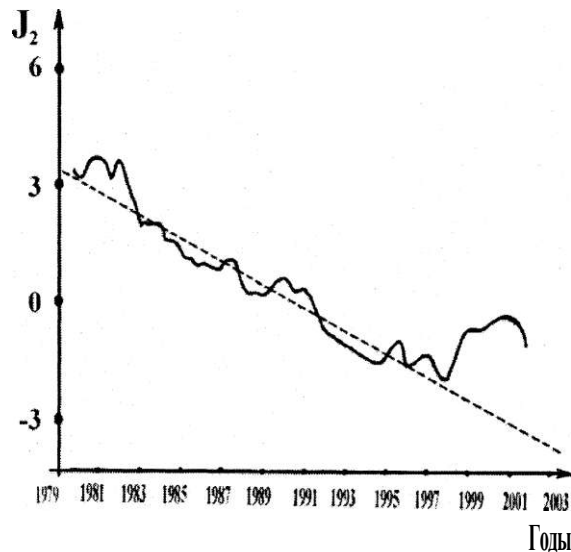


Рис. 103. График, отражающий вариации коэффициента J_2

Специалисты NASA связывают полученные по данным ЛДС отклонения орбит искусственных спутников Земли с глобальными изменениями гравитационного поля Земли.

Нам хотелось бы акцентировать внимание на том, что эти отклонения имеют квадрупольный характер. Между тем, к сожалению, специалисты NASA не приняли этот факт во внимание, считая на сегодня необъяснимыми причины изменений, происходящих в гравитационном поле Земли (рис. 104).

Произведенное нами сравнение вариаций коэффициента J_2 с синусоидальным трендом вариаций гравитационной постоянной с 1985 по 2002 год, отражающим, по нашему мнению, прохождение через Землю сверхдлинных гравитационных волн, позволило получить весьма интересный результат. Если рассматривать период с 1985 по 1998 год, то можно констатировать весьма высокую корреляцию между обоими графиками, имеющими волновой характер. Однако, начиная с 1998 года, картина резко меняется, и графики переходят в противофазу. Учитывая, что именно с 1998 года, наблюдается резкое изменение в поведении коэффициента J_2 , нам представляется особенно интересным рассмотрение именно данного фрагмента графика, приведенного на рис. 105.

Как видно на рис. 105, область А охватывает период времени, в течение которого наблюдалось изменение характера динамики коэффициента J_2 .

Из сравнения вариаций J_2 и синусоидального тренда G становится очевидным, что в 1998 г. произошли серьезные изменения в динамике J_2 , которые в то же

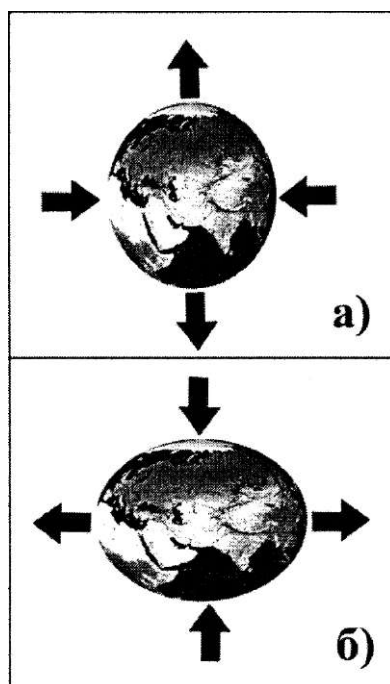


Рис. 104. Схема, отражающая деформацию Земли по данным NASA
а) - характер деформации Земли до 1998 г.; б) - характер деформации Земли после 1998 г.

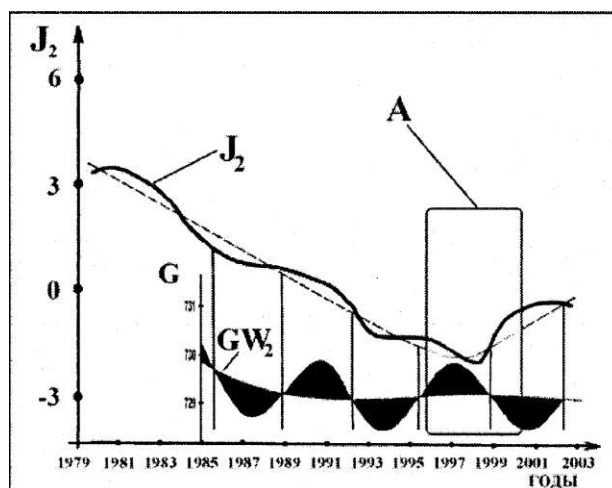


Рис. 105. Сравнение графиков вариаций коэффициента J_2 и синусоидального тренда вариаций гравитационной постоянной G , отражающего прохождение через Землю сверхдлинных гравитационных волн

J_2 - график вариаций в зональном коэффициенте сферической гармоники Земли второй степени J ; GW_2 - синусоидальный тренд вариаций гравитационной постоянной, отражающий гравитационные волны второго порядка

время не нашли своего отражения в вариациях синусоидального тренда G . В то же время необходимо иметь в виду, что синусоидальный тренд может сглаживать определенные артефакты, происходящие в реальных динамических процессах. Поэтому для сравнения с коэффициентом J_2 нами были взяты истинные значения вариаций G . Как видно из рис. 106, картина несколько проясняется. В характере вариаций значений G также наблюдается изменение, начиная с 1998 года, что отражается в стабилизации G , без видимых отклонений по сравнению с предыдущими годами. Этот факт, на наш взгляд, может объясняться двумя основными причинами.

Первой причиной может являться прохождение через Землю других гравитационных волн, которые в результате интерференции с наблюдаемой волной компенсировали амплитуду первой. Вторая причина, возможно, связана с завершением прохождения гравитационно-волнового импульса, что также привело к изменению формы Земли и стабилизации G . Однако вывод очевиден - существует корреляция между коэффициентом J_2 и временными вариациями G .

На рис. 107 показан фрагмент сравнения графика J_2 и вариаций истинных измеренных значений G , на котором более детально можно рассмотреть описанные выше особенности.

Рассматривая влияние сверхдлинных гравитационных волн на деформацию Земли и, как следствие, на геодинамические процессы, необходимо отметить, что эта деформация должна иметь весьма сложные проявления. Так, на рис. 108 по-

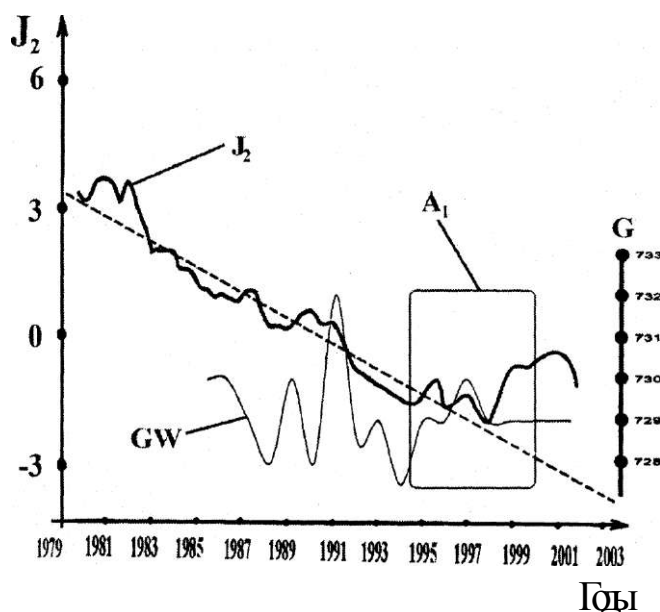


Рис. 106. Сравнение графика вариаций J_2 и вариаций истинных измеренных значений G , усредненных за год

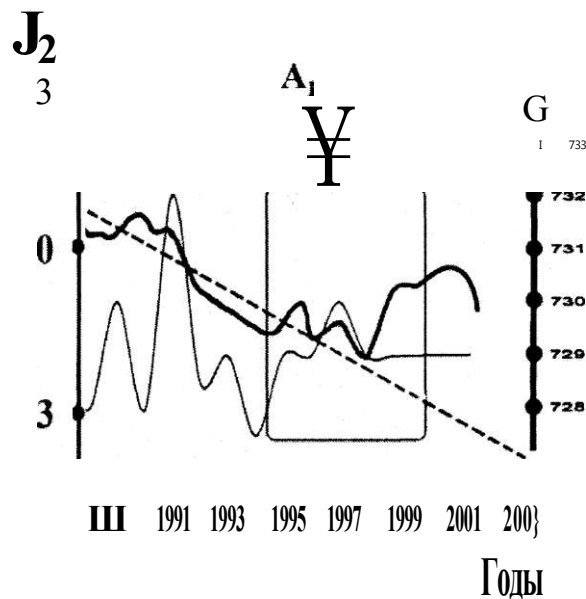


Рис. 107. Фрагмент сравнения графика вариаций J_2 и вариаций истинных измеренных значений G , усредненных за год

казана реакция Земли на прохождение гравитационной волны по направлению стрелки (а) и перпендикулярно плоскости листа (б). Необходимо иметь в виду, что картина еще более усложняется, если учесть вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, а также движение Солнечной системы в Галактике.

Рассмотрим прохождение через Землю сверхдлинной гравитационной волны, падающей под разными углами. На рис. 109 показаны плоскости A , A_1 , A_2 , характеризующие фронт падающей гравитационной волны при различных направлениях ее распространения.

Учитывая, что период обращения Земли вокруг своей оси (24 часа) существенно меньше периода сверхдлинных гравитационных волн (2,5 года и 7,7 лет), наибольшей квадрупольной деформации Земля будет подвергаться при прохождении гравитационных волн параллельно и перпендикулярно оси вращения, т.е. когда плоскостями фронта сверхдлинной гравитационной волны являются A , и A_1 . Именно при таких направлениях распространения сверхдлинных гравитационных волн будет наблюдаться деформация, характер которой зарегистрирован NASA при исследованиях коэффициента J_0 . Тот есть Земля попеременно будет сжиматься в полюсах и расширяться в экваторе, и наоборот. При любых других направлениях этот эффект будет уменьшаться из-за вращения Земли вокруг своей оси и достигать минимума, когда гравитационная волна, проходящая через Землю, будет падать под углом 45° по отношению к оси вращения Земли. На рис. 109

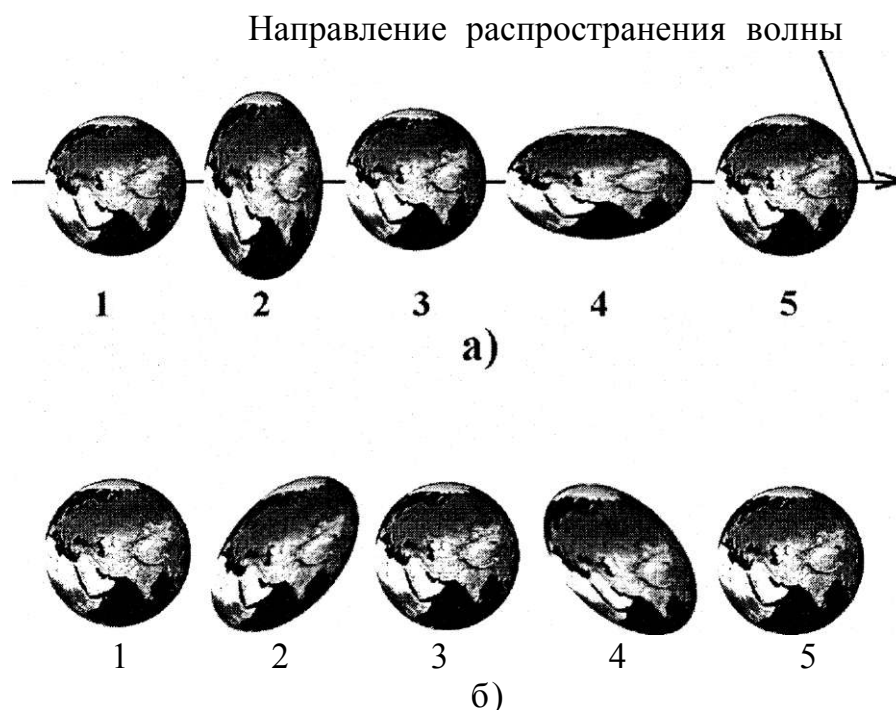


Рис. 108. Деформация Земли при прохождении через нее сверхдлинной гравитационной волны

а) деформация формы Земли при направлении распространения гравитационной волны, показанном стрелкой; б) деформация формы Земли при направлении распространения гравитационной волны перпендикулярно к плоскости настоящего листа. 1,3,5 - в момент смены полупериодов гравитационной волны Земля приобретает свою естественную форму; 2 - изменение формы Земли при прохождении первого полупериода гравитационной волны; 4 - изменение формы Земли при прохождении второго полупериода гравитационной волны

плоскость A_2 отражает фронт падающей гравитационной волны под углом 45° по отношению к оси вращения Земли.

Таким образом, эффективность квадрупольной деформации Земли в результате прохождения через нее сверхдлинных гравитационных волн будет зависеть от периода этих волн, их амплитуды и ориентации по отношению к оси вращения Земли.

В своих исследованиях Кип Торн показывает, что прямое влияние гравитационных волн на деформацию Земли ничтожно мало. Мы можем согласиться с этим только с точки зрения непосредственного влияния амплитуды возмущения метрики пространства в поле гравитационной волны на линейные параметры деформации Земли. Между тем влияние гравитационной волны на Землю мы рас-

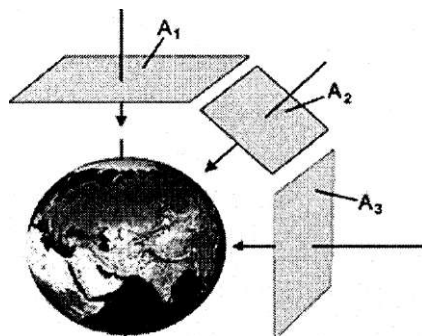


Рис. 109. Схема, изображающая прохождение сверхдлинных гравитационных волн через Землю под разными углами

смаатриваем значительно сложнее. Гравитационная волна, проходящая через пространство, создает определенное напряжение в каждой точке пространства, тензор которого отражает квадрупольный характер влияния гравитационной волны на пространство. Таким образом, при существовании любых равновесных энергетических процессов, протекающих во всех слоях Земли - атмосфере, гидросфере, литосфере, мантии и ядре - тензор напряжений, формируемый гравитационной волной в каждой точке пространства, создает приоритетные направления, постепенно изменяющие направления протекания энергетических процессов в Земле.

4.6.4. Земля - универсальный детектор гравитационных волн

Наиболее яркими и чувствительными индикаторами современной геодинамической активности Земли являются землетрясения и извержения вулканов.

Безусловно, если считать справедливым предположение о возможности прохождения через Землю сверхдлиннопериодных гравитационных волн, то они в обязательном порядке должны отразиться на геодинамических процессах, в частности, на пространственно-временном распределении землетрясений Мира.

Так, при прохождении через Землю гравитационная волна сначала несколько вытянет Землю по направлению своего движения, одновременно сузив перпендикулярно ему, затем, наоборот, сожмет по направлению движения и расширит перпендикулярно ему. Безусловно, этот процесс должен найти свое отражение в цикличности и пространственно-временном распределении землетрясений Мира.

Для изучения характера изменений сейсмической активности Земли с 1985 по 2000 годы нами были использованы данные каталогов USGS Earthquake Hazards Program.

Нами рассматривались землетрясения с магнитудой $M > 5$. С 1985 по 2000 годы в Море было зарегистрировано 1190 землетрясений с $M > 5$.

На рис. 110 приведен график сейсмической активности Земли, построенный на основе усредненного за год числа землетрясений с магнитудой $M > 5$.

На графике отчетливо выявились циклы высокой сейсмической активности с периодом, в среднем, $T \sim 2-2,5$ года. Как видно, величина периода циклов сейсмической активизации полностью совпала со значением периодов вариаций измеренных значений гравитационной постоянной G .

Этот факт подтверждает наше предположение о возможности влияния этих вариаций на сейсмическую активность Земли. Между тем, на фоне указанных циклов сейсмической активности, явно проглядывается тренд. Наиболее достоверно и четко данный сейсмический процесс описывает тренд, аппроксимированный полиномиальным рядом пятой степени, приведенный на рис. 110 и описываемый уравнением:

$$y = -0,0534x^3 + 1,4495x^2 - 9,0845x + 77,932. \quad (4.30)$$

Приведенный тренд свидетельствует о наличии в сейсмической активности более крупных циклов, длительностью около 22 лет, что абсолютно подтверждено многочисленными результатами исследований как сейсмической, так и вулканической активностей (Мехтиев, Хаин, Халилов, 1985, 1986, 1987).

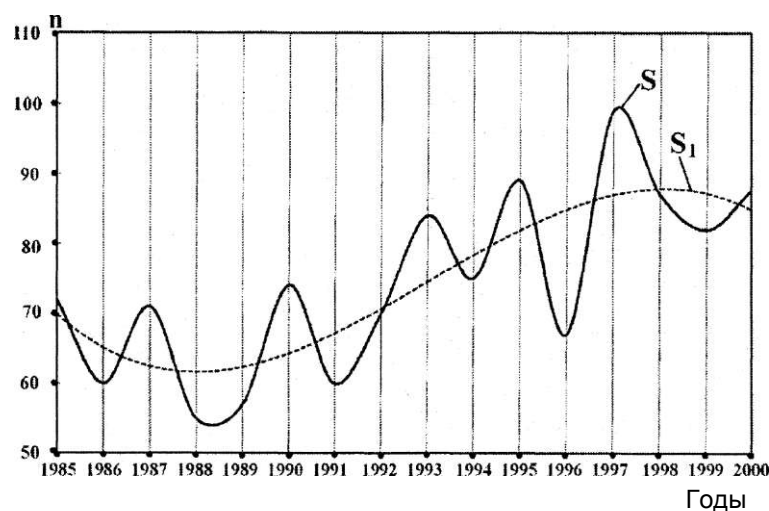


Рис. 110. График сейсмической активности Земли с 1985 по 2000 годы

S — график сейсмической активности Земли; S — тренд, аппроксимированный полиномиальным рядом пятой степени; n — число землетрясений, усредненное за год

Таким образом становится, очевидно, что, так же как и в вариациях измеренных значений G , график сейсмической активности S представляет собой результирующую кривую, образованную в результате наложения по меньшей мере двух гармонических процессов: несущей частоты с периодом 2-2,5 года и модулирующей по амплитуде гармонике с периодом 22 года. В то же время в работах П.Н. Кропоткина (1978), Э.Н. Халилова (2002, 2003) показано, что в сейсмической активности ярко выражены циклы с длительностью периодов 7; 11; 22; 44; 90-100 лет.

Особый интерес представляет сравнение графиков вариаций измеренных значений G и сейсмической активности Земли S , приведенное на рис. 111.

Как видно из рис. 111, первые три цикла графиков сейсмической активности и вариаций G попали преимущественно в противофазу, тогда как вторые три цикла полностью совпали. Таким образом, результат сравнения не позволил установить однозначного совпадения фаз (противофаз) циклов сейсмической активности и вариаций G . Но совершенно очевидно, что порядок циклов как сейсмической активности, так и вариаций G идентичен.

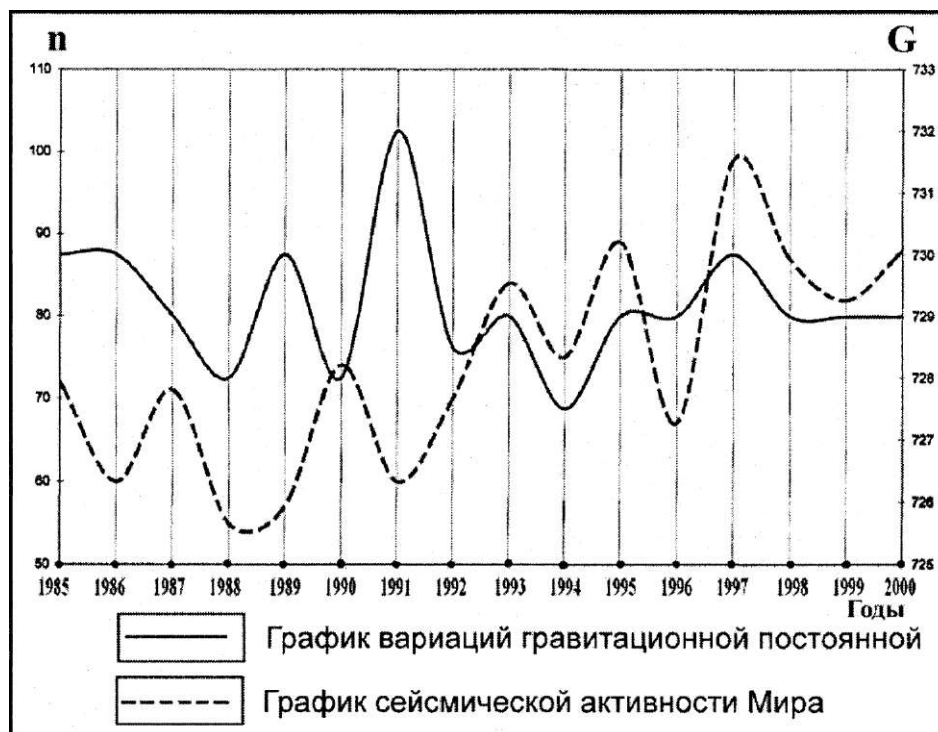


Рис. 111. Сравнение графиков вариаций измеренных значений гравитационной постоянной G и сейсмической активности Мира с 1985 по 2000 годы

Ось G - значения G начиная со второй цифры после запятой; ось n - усредненное число землетрясений с $M>5$ за год

Для более достоверного выявления гармонических составляющих во временных рядах вариаций измеренных значений G и сейсмической активности Земли с 1985 по 2000 годы нами был произведен спектральный анализ указанных временных рядов и построены периодограммы. При этом был применен метод максимальной энтропии (ММЭ) и алгоритм Бурга. На рис. 112 приведены периодограммы с выделенными гармониками в вариациях G и сейсмической активности.

Как видно из приведенных периодограмм, во временных вариациях измеренных значений G выделяются две ярко выраженные гармоника с периодами 2,4 и 7,7 лет, что полностью подтверждает результаты проведенного нами анализа временного ряда.

В то же время, на периодограмме сейсмической активности наиболее ярко проявилась гармоника с периодом 2,6 года, что также подтверждает ранее установленный период среднего цикла сейсмической активности в рассматриваемом временном ряду. Кроме того, на второй периодограмме дополнительно выявилась, хотя и слабо, гармоника с периодом 11,2 года, совпадающая с длительностью

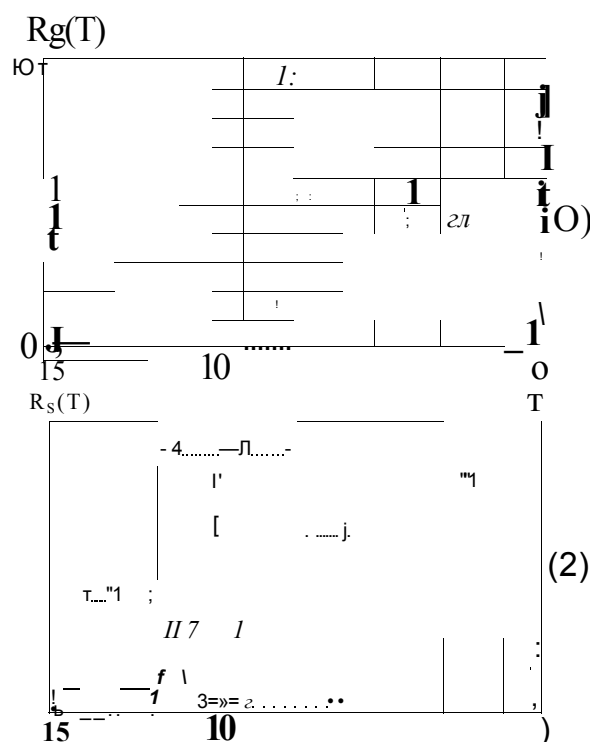


Рис. 112. Периодограммы вариаций измеренных значений G и сейсмической активности Земли

(1) - периодограмма вариаций G ; (2) - периодограмма сейсмической активности Земли;
 T - период

11-летнего цикла солнечной активности. Слабая выраженность этой гармоникой, по нашему мнению, связана с малой длиной ряда, сопоставимой с периодом выделенной гармоникой. Между тем в проявлении планетарной сейсмической активности гармоника с периодом в среднем 11 лет достаточно уверенно выделена в работах Э.Н. Халилова (1986, 2000).

В то же время, было бы, на наш взгляд, совершенно неверно ожидать простого совпадения во времени двух совершенно различных по физической сути процессов, к тому же отражающих сложное наложение различных гармонических составляющих.

Нам хотелось бы глубже остановиться на возможном физическом механизме связи этих двух процессов.

Как уже отмечалось, прохождение гравитационной волны должно вызывать квадрупольное изменение формы тела, через которое она проходит. В случае с Землей квадрупольный характер ее изменения был описан выше. Таким образом, прохождение первой полу волны должно привести к напряжениям сжатия в Земле перпендикулярно направлению движения волны, и напряжениям растяжения вдоль направления волны. Очевидно, что максимальные напряжения сжатия будут наблюдаться при прохождении центральной части (с максимальной амплитудой) первой полу волны. В этот момент должен наблюдаться пик сейсмической активности на планете, причем за счет землетрясений, очаги которых будут испытывать напряжение сжатия, направленное перпендикулярно гравитационной волне.

Затем интегральные напряжения в Земле должны уменьшаться и стать минимальными в момент смены знака напряжения и перехода от первого полупериода волны ко второму. В этот момент механические напряжения в Земле, создаваемые гравитационной волной, должны быть равны ~ 0 . Фоновая сейсмичность в это время связана исключительно с внутренними геодинамическими и космическими факторами (солнечной активностью, лунно-солнечными приливами и т.д.). Сейсмическая активность в данный период, должна иметь минимальное значение.

При вступлении второго полупериода гравитационной волны напряжения в Земле поменяют знак на противоположный, и теперь уже сейсмическая активность планеты начнет расти за счет очагов землетрясений, тензоры напряжений сжатия которых будут ориентированы параллельно направлению движения гравитационной волны. Для проверки вышеприведенной концепции рассмотрим сравнение графиков синусоидального тренда вариаций G (гравитационной волны второго порядка) с графиком сейсмической активности Земли S (рис. 113).

На рис. 113 подтвердился рассмотренный нами механизм влияния прохождения гравитационной волны на сейсмическую активность Земли. Так, рассматривая первый полупериод гравитационной волны, мы видим, что он полностью совпал с периодом сейсмической активности, тогда как минимум сейсмической активности приходится на момент смены полупериодов, когда напряжения в Земле должны принять минимальные значения.

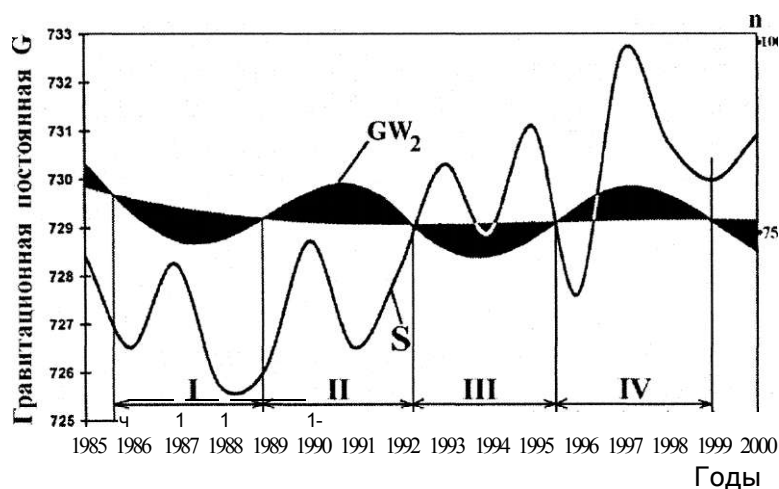


Рис. 113. Сравнение графиков сейсмической активности Земли и синусоидального тренда, измеренных значений вариаций гравитационной постоянной G с 1985 по 2000 годы

Ось G - значения гравитационной постоянной, начиная со второй цифры после запятой; ось n - усредненное за год число землетрясений с $M > 5$; GW_2 - гравитационная волна второго порядка (синусоидальный тренд вариаций G); S - график сейсмической активности Земли

Второй цикл сейсмической активности также совпал со вторым полупериодом гравитационной волны, и опять снижение сейсмической активности приходится на смену полупериодов волны. На третий полупериод гравитационной волны, приходится сразу два цикла сейсмической активности. Причина раздвоения цикла сейсмической активности становится ясной при просмотре рис. 111, где отчетливо видно влияние гравитационной волны первого порядка на данные циклы сейсмической активности. По всей видимости, сложный характер наложения гравитационных волн различной частоты накладывает свой отпечаток и на проявление характера цикличности сейсмической активности. Затем опять момент смены полупериодов гравитационной волны сопровождается снижением сейсмической активности, и вступление следующей гравитационной полу волны приводит к повышению сейсмической активности, с максимумом в зоне максимальной амплитуды гравитационной полу волны. Смена знака четвертой гравитационной полу волны опять сопровождается резким снижением напряжений в Земле и уменьшением ее сейсмической активности.

На рис. 114 на основе реальных данных сейсмической активности Земли и вариаций измеренных значений гравитационной постоянной G (гравитационной волны второго порядка) рассматривается модель возможного влияния сверхдлинной гравитационной волны на изменения формы Земли с 1985 по 1992 годы.

Как видно из рис. 114, исходя из особенностей квадрупольного характера влияния гравитационной волны на тела, через которые она проходит, Земля будет подвергаться достаточно сложным деформациям.

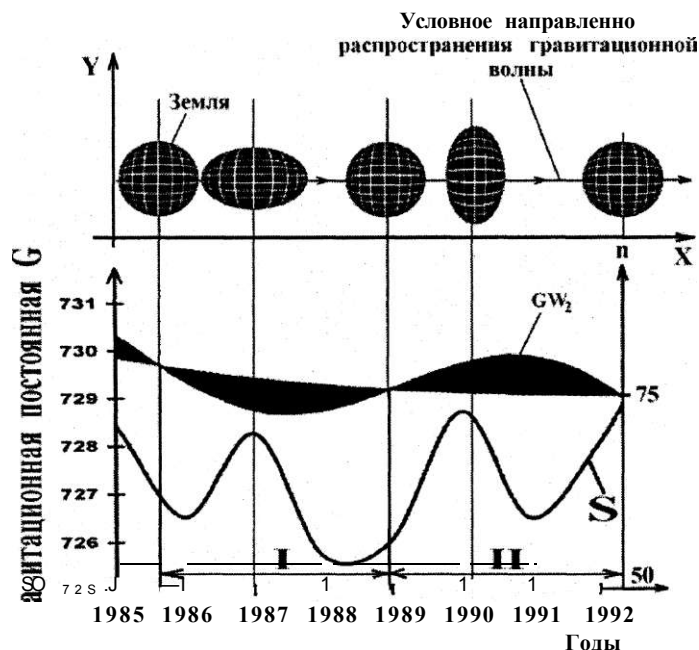


Рис. 114. Модель влияния гравитационной волны на изменения формы Земли на основе реальных значений вариаций G и сейсмической активности S

Для наглядности масштабы деформаций Земли сильно преувеличены. Ось G - значения гравитационной постоянной, начиная со второй цифры после запятой; ось n - усредненное за год число землетрясений с $M > 5$; GW_2 - гравитационная волна второго порядка (синусоидальный тренд вариаций G); S - график сейсмической активности Земли

Полученные нами данные о квадрупольном характере деформаций Земли под действием гравитационных волн согласуются с результатами исследований Н.Н. Парийского (1984) и Ю.Д. Буланже (1981).

Ю.Д. Буланже (1981) были приведены результаты наблюдений нерегулярных глобальных изменений силы тяжести на поверхности Земли в течение 1976—1981 гг. - около 8-9 мкГал в год для северного полушария и первых мкГал в год - для южного полушария, что соответствует относительному изменению силы тяжести $\Delta g/g \sim 5 \cdot 10^{-9}$ в год.

Н.Н. Парийский провел анализ нерегулярных изменений угловой скорости вращения Земли за тот же период и показал, что за вычетом изменений, обусловленных вариациями кинетического момента атмосферы, остаточная кривая нерегулярных изменений угловой скорости вращения Земли, хорошо коррелируется с данными по нерегулярным изменениям силы тяжести, приведенным Ю.Д. Буланже.

При этом делается главный вывод о том, что положительным значениям Δg соответствуют отрицательные значения $\Delta \rho$, а не положительные, как это было бы при общем сжатии Земли. Как указывается в работе Ю.Д. Буланже (1981), приведенный результат соответствует ситуации, когда сжатие Земли в месте измерения будет соответствовать общему увеличению момента инерции Земли, что возможно только, если в другом месте земного шара происходит расширение. Деформация в этом случае носит квадрупольный характер.

Д.Д. Иваненко и Б.Н. Фролов (1984) отмечают, что существует только один механизм, способный объяснить квадрупольный характер деформации Земли как следствие гравитационного эффекта. Этот эффект может наблюдаться, если земной шар оказывается в поле падающей гравитационной волны, при этом Земля ведет себя подобно детектору гравитационных волн.

Наши выводы о влиянии гравитационных волн на сейсмичность Земли в результате квадрупольной деформации земного шара также подтверждаются результатами исследования нерегулярных глобальных вариаций силы тяжести и нерегулярных изменений угловой скорости вращения Земли, приведенными в работах Ю.Д. Буланже (1980, 1981, 1983).

Таким образом, исходя из вышеизложенного, мы приходим к предварительному заключению, что наблюдаемые вариации измеренных значений гравитационной постоянной G , отражают прохождение через Землю сверхдлиннопериодных гравитационных волн, вызывающих квадрупольные напряжения в Земле и, как следствие, соответствующее пространственно-временное распределение сейсмической активности Земли и вариаций тензоров напряжений в очагах землетрясе-

На наш взгляд, прохождение через Землю сверхдлиннопериодных гравитационных волн формирует основные циклы общепланетарной геодинамической активности. Кроме того, прохождение через нашу планету гравитационных волн различных частот и направлений должно приводить к сложной интерференционной картине, что должно найти свое отражение в природных процессах.

Учитывая, что гравитационные волны проходят не только через Землю, но и через всю Солнечную систему, можно предположить аналогичную реакцию на гравитационные волны и других планет. В этом случае в зависимости от направления волны, должно наблюдаться либо некоторое опережение, либо запаздывание реакции Земли по отношению к реакции Солнца и других планет на гравитационную волну, что связано с конечностью скорости гравитационных волн, равной скорости света. Т.е. волна будет проходить сначала через Землю или через Солнце, в зависимости от направления.

Не исключено, что цикличность солнечной активности напрямую связана с прохождением через Солнце сверхдлиннопериодной гравитационной волны.

Таким образом, Земля фактически играет роль масс-резонансного детектора сверхдлинных гравитационных волн. Естественно, что наибольшая амплитуда деформационных колебаний Земли должна наблюдаться в том случае, когда час-

тота гравитационной волны будет совпадать с собственной частотой колебаний Земли.

В 1911 году математик Ляв вычислил период собственных колебаний стального шара размером с Землю. Оказалось, что он будет равен одному часу. Первые собственные колебания Земли, с периодом 57 мин, обнаружены Г. Беньофом в 1952 году, после землетрясения на Камчатке. Зарегистрированы колебания Земли с периодом 54 мин после Чилийского землетрясения в 1960 году.

Поскольку Земля - не однородный стальной шар, а имеет значительно более сложное строение, то и собственные колебания имеют достаточно богатый спектр. *Существуют два типа собственных колебаний упругого шара, которые называют модами. Сфероидальные колебания дают моду S (с периодом 54 мин. что на 6 мин меньше теоретического значения, полученного Лявом; это отличие указывает, прежде всего, на отличие Земли от однородного стального шара), а крутильные колебания - моду Т. Этому крутильному колебанию соответствует только одна поверхность, секущая поверхность Земли по экватору. При этом северное и южное полушария смещаются в противоположные стороны. Среди других мод (своего рода гармоник) существуют и такие, период которых значительно отличается от теоретического. Собственные колебания - прекрасный материал для тестирования принятой модели Земли. Они могут быть вычислены заранее, теоретически. С другой стороны, собственные колебания Земли получены путем наблюдений, с использованием, например, того факта, что сила тяжести зависит от высоты точки, где она наблюдается. Вертикальный градиент силы тяжести составляет приблизительно 300 мкГал/м. Заметим, что 1 мкГал составляет приблизительно $10^{-9}g$. Изменение высоты всего на 1 мм вызывает изменение силы тяжести на 0,3 мкГал. Сейчас существуют приборы, способные зарегистрировать значительно меньшие изменения силы тяжести - это криогенные гравиметры.*

Таким образом, не исключено, что одной из причин собственных колебаний Земли может являться их возбуждение проходящими через Землю, на ее резонансной частоте, сверхдлинными гравитационными волнами.

4.6.5. Влияние сверхдлинных гравитационных волн на вариации длительности земных суток

Неравномерность скорости суточного вращения Земли была обнаружена еще в начале XX века.

Эти вариации суточного вращения Земли, по мнению В.М. Киселева (1980), выражаются в основном тремя способами. 1) Ось вращения меняет свою ориентацию в пространстве. 2) Ось вращения Земли меняет свое положение относительно поверхности Земли. 3) Угловая скорость вращения Земли переменна относительно мгновенной оси.

Изменения пространственного положения земной оси обусловлены в основном гравитационным воздействием Луны, Солнца и планет Солнечной системы на Землю. Эта величина достаточно точно рассчитывается. Значительно сложнее дело обстоит со вторым и третьим аспектами, которые проявляются соответственно в виде движения полюсов относительно поверхности Земли и вариаций угловой скорости вращения Земли. Движения полюсов распадается на три составляющие: движение с периодом в 14 месяцев переменной амплитуды, равной $0,1''$, открытое Чандлером; движение с годичным периодом и амплитудой $0,08''$, соответствующей 2,5 м на земной поверхности; и очень медленное и неправильное вековое движение, в среднем около $0,003''$ или 10 см в год (Михайлов, 1984).

Чандлерово движение соответствует свободному движению полюсов. На сегодня нет однозначного ответа, объясняющего причины таких колебаний, при этом существуют различные гипотезы, в том числе связывающие эти колебания с сильными землетрясениями и извержениями вулканов. Годичные колебания связывают с метеорологическими явлениями - отложениями снега и таянием снегов, скоплением зимой воздушных масс над северо-восточной Азией, когда атмосферное давление становится выше обычного. Вековое движение полюса не подчиняется четким закономерностям и на сегодня, не имеет однозначного объяснения (Михайлов, 1984).

Эти типы движений не рассматриваются в данной работе, поэтому основное внимание будет уделено неравномерности в скорости суточного вращения Земли.

Обычно выделяют три основных аспекта в изменениях длительности земных суток: 1) вековые изменения на 1-2 мс за 100 лет; 2) сезонные вариации с амплитудой около 0,5 мс; 3) нерегулярные изменения от года к году, величина которых более чем на порядок превосходит вековые изменения.

Вековые изменения длительности суток связаны преимущественно с действием приливообразующих сил, возникающих в результате гравитационного взаимодействия Земли с Луной и Солнцем. Сезонные вариации угловой скорости вращения Земли обусловлены изменениями зональной циркуляции атмосферы в течение года и, частично, лунными приливами.

Впервые на существование нерегулярных изменений скорости вращения Земли обратил внимание еще Ньютон в 1875 году, исследуя движение Луны. Наличие нерегулярных изменений во вращении Земли стало очевидным после работ Де Ситера и Спенсера Джонса, которыми были обнаружены одновременные изменения в среднем движении Луны, Солнца, Меркурия, Венеры, Марса и спутников Юпитера, пропорциональные их средним движениям. Однако до настоящего времени не сложилось однозначного мнения относительно причин нерегулярного изменения угловой скорости вращения Земли.

На рис. 115 показан график нерегулярных вариаций длительности земных суток с 1850 по 2000 годы, сглаженный пятилетними скользящими средними.

Различные исследователи пытались выдвигать концепции, объясняющие механизм нерегулярных изменений суточного вращения Земли.

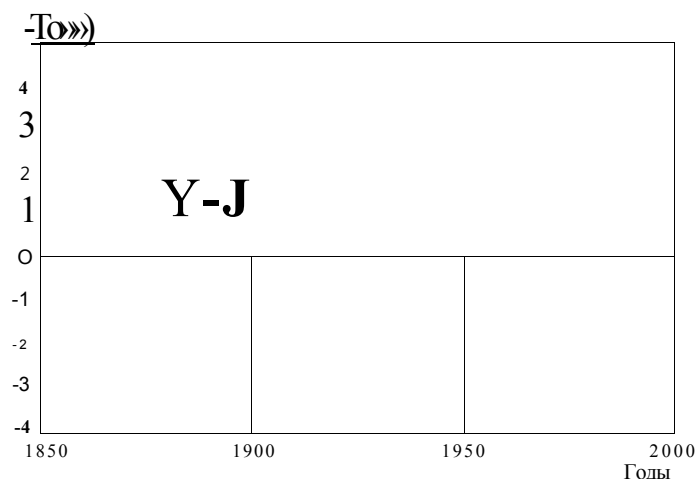


Рис. 115. График вариаций длительности суток с 1850 по 2000 годы, построенный по данным В.М. Кисилева (1980)

Y - график вариаций длительности суток; ось Y, (ms) - изменения длительности суток

Так, в работах У. Манка и Д. Макдональда (1964), И. Шатцмана (Schatzman, 1960) рассматривались исследования взаимодействия геомагнитного поля с межпланетной средой и возможность влияния этого взаимодействия на вариации угловой скорости вращения Земли.

В работе Ю.А. Бильде (1976) показано, что заметные изменения скорости вращения Земли могут возникнуть, когда частота изменения внешнего магнитного поля (например, ионосферного происхождения) максимально близка к частоте вращения Земли.

В работе Дж. Гинзберга (1972) приводятся оценки вращательного момента, возникающего в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем, при этом показано, что этот момент недостаточен для объяснения наблюдаемых изменений длительности земных суток.

В 1965 году была высказана гипотеза о том, что импульсные изменения скорости суточного вращения Земли могут быть обусловлены электромагнитным взаимодействием Земли с потоками солнечной плазмы, обладающими бесспиновой конфигурацией магнитных полей, названной М-элементами (Афанасьев, 1965).

Эта идея впоследствии была развита в работе Н.П. Беньковой и Э.Н. Могилевского (1976), где показано, что если в солнечном ветре существуют плазменные образования с характеристиками М-элементов, с их помощью можно объяснить внезапные изменения скорости суточного вращения Земли.

Наиболее близко, на наш взгляд, к выяснению истинных причин, влияющих на вариации угловой скорости вращения Земли, подошли П.Н. Кропоткин, Н.Н. Парийский и другие исследователи, связывающие наблюдаемые изменения скорости суточного вращения Земли с возможными изменениями ее радиуса и

формы (Кропоткин, 1984; Khain, Khalilov, 2003, 2004, 2007; Хаин, Халилов, 2008; Мехтиев, Халилов, 1984, 1987; Парийский, 1984). Так, в работе П.Н. Кропоткина указано, что периодические изменения радиуса Земли являются первопричиной как цикличности в проявлениях тектонических процессов, так и вариаций угловой скорости вращения Земли. Одновременно эта же идея выдвигается В.Е. Хаиным, Ш.Ф. Мехтиевым и Э.Н. Халиловым (1984), где так же, как и в работе П.Н. Кропоткина (1984), делается вывод о периодических изменениях радиуса Земли, при этом в периоды сжатия Земли уменьшение радиуса происходит за счет активизации процесса субдукции и замедления процесса спрединга, а в периоды расширения Земли - происходит обратный процесс.

Примечательно, что в работе П.Н. Кропоткина (1984) установлена хорошая корреляция между Чандлеровскими движениями, угловой скоростью вращения Земли и сейсмической активностью, что позволяет увязать все эти процессы в единую, логически обоснованную, систему.

Теоретические расчеты упругой деформации Земли и соответствующих изменений ее момента инерции, ее вращения и силы тяжести на поверхности, были сделаны Н.Н. Парийским еще в 1954 г.

На основе проведенных вычислений Н.Н. Парийский (1984) пришел к выводу, что ни эффекты, вызванные солнечной активностью, ни атмосферные явления не могут вызвать наблюдаемых изменений угловой скорости вращения Земли. По его мнению, эти вариации могут являться результатом глобальных деформационных процессов в Земле, приводящих не только к периодическому изменению ее радиуса, но также к сложному изменению ее формы. Судя по его описанию этого процесса, он должен носить квадрупольный характер, т.е. Земля должна «менять свою форму, расширяясь в средних и полярных областях и на порядок больше сжимаясь в экваториальных».

Примечательно, что именно такой характер деформаций Земля должна претерпевать в случае прохождения через нее гравитационной волны (Иваненко, 1966; Халилов, 1989).

Приведенный в работе Д.Д. Иваненко и Б.Н. Фролова (1984) результат исследований нерегулярных изменений силы тяжести соответствует ситуации, когда сжатию Земли в месте измерения будет соответствовать общее увеличение момента инерции Земли, что возможно только, если в другом месте земного шара происходит расширение.

Интересные результаты были получены В.М. Федоровым (2005) при исследованиях особенностей суточного распределения сильных землетрясений в связи с вращением Земли. Так, по мнению исследователя, существуют некоторые, на наш взгляд, не очевидные, особенности в распределении катастрофических землетрясений в суточном цикле вращения Земли. Эти особенности объясняются причинно-следственной зависимостью распределения землетрясений от динамики составляющих приливообразующих сил Луны и Солнца в связи с суточным вращением Земли.

При исследованиях корреляционной связи глобальной сейсмической активности Земли со скоростью ее вращения группа ученых (Фридман, Клименко, Поляченко, Фридман, 2005) пришла к интересным выводам. 1) Корреляция между частотой поверхностных землетрясений и угловым ускорением Земли монотонно растет с ростом магнитуды. 2) Корреляции между сейсмической активностью и изменениями угловой скорости вращения Земли в зонах субдукции, направленных вдоль широты и вдоль меридиана, качественно отличаются. В результате авторы делают заключение, в соответствии с которым «за изменение годовой сейсмической активности и за изменение угловой скорости вращения Земли отвечают процессы сжатия и растяжения земной коры в направлении, поперечном оси вращения». Надо отметить, что данное заключение в определенной степени подтверждает наши выводы, приведенные в предыдущих и в настоящей работе.

В последних работах известного исследователя неравномерности вращения Земли Н.С. Сидоренкова сделаны интересные выводы о связи нестабильности вращения Земли с гидрометеорологическими процессами.

Эти исследования положены в основу запатентованного Н.С. Сидоренковым и П.Н. Сидоренковым в 2002 году способа прогноза гидрометеорологических характеристик. В работах Н.С. Сидоренкова отмечается, что между приливными колебаниями скорости вращения Земли и изменениями синоптических процессов в атмосфере имеется статистически значимое соответствие. Естественные синоптические периоды совпадают с режимами вращения Земли. Приливные колебания скорости ее вращения обусловлены лунно-солнечными зональными приливами. По мнению указанных исследователей, эволюция синоптических процессов в атмосфере происходит не только за счет внутренней динамики климатической системы, но и под управлением лунно-солнечных зональных приливов (Сидоренков, 2004).

Проведенные в последние годы исследования ряда ученых (Жаров, Пасынок, 2004) позволили прийти к выводу, что вариации угловой скорости вращения Земли имеют очень сложный характер, при этом в них наблюдаются гармоника совершенно разных порядков. Накладываясь друг на друга, эти гармоника создают весьма сложную картину изменения длительности земных суток. Исходя из этого, В.Н. Жаров и С.И. Пасынок попытались разработать теорию вращения Земли, назвав ее новой теорией нутации. В соответствии с данной теорией, нутация вращения Земли представляется как достаточно сложная, но стройная система, в которой существует своеобразная иерархия множества наложенных друг на друга нутационных движений оси вращения разных порядков. По нашему мнению, новая теория нутации достаточно близка к истине, если в ней учесть и влияние других космических факторов, таких, как прохождение через Землю сверхдлинных гравитационных волн.

На наш взгляд, представляет большой интерес выяснение возможной связи между волновыми вариациями гравитационной постоянной G и изменениями угловой скорости вращения Земли.

На график вариаций G был наложен тренд, аппроксимированный синусоидой GW_2 .

Наше внимание будет акцентировано на выявлении возможной связи между вариациями измеренных значений G и изменениями угловой скорости вращения Земли.

Волновые вариации G нами рассматриваются как результат влияния проходящих через Землю гравитационных волн на взаимодействие масс крутильных весов, с помощью которых производится измерение гравитационной постоянной G .

Как видно из рис. 116, в вариациях длительности суток выделяются волнообразные отклонения с периодом, в среднем 2-2,5 года, совпадающие с периодом волнообразных изменений G , который также равен 2-2,5 годам. Эти вариации условно названы нами вариациями первого порядка. Для отображения волнообразного процесса, на график наблюдаемых значений вариаций длительности суток y , был наложен тренд y_2 , аппроксимированный полиномиальным рядом пятой степени и отражающий цикл с периодом 13 лет. Этот тренд условно назван нами вариациями длительности суток второго порядка.

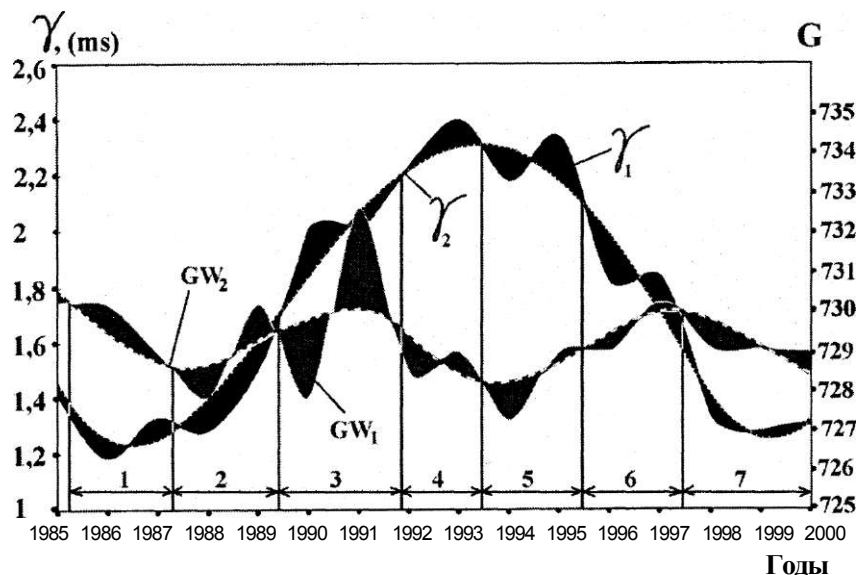


Рис. 116. Сравнение графиков вариаций измеренных значений гравитационной постоянной <7 (гравитационной волны первого порядка) и изменения скорости суточного вращения Земли, по данным Н.С. Сидоренкова (1975)

Ось $y, (ms)$ - изменения длительности суток в ms ; ось G - значения G , начиная со второй цифры после запятой; GW , - график фактических значений вариаций гравитационной постоянной, усредненных за год (гравитационная волна первого порядка); GW_2 - тренд, аппроксимированный синусоидой (гравитационная волна второго порядка); y_1 - вариации длительности суток первого порядка; y_2 - тренд, аппроксимированный полиномиальным рядом пятой степени и отражающий вариации длительности суток второго порядка

Сравнение графика GW, с графиком y , показало, что в 100% случаях моменты смены знака и перехода одного полупериода волны к другому на обоих графиках совпали. Кроме того, если рассматривать эти колебания как волновые процессы, последние три волновых цикла попали в фазу, тогда как только один - третий в противофазу.

Такое соотношение между графиками, отражающими гравитационную волну первого порядка и вариации длительности суток первого порядка, может быть объяснено с точки зрения влияния гравитационной волны на процессы деформации Земли.

С целью повышения достоверности выявления гармонических составляющих во временных рядах вариаций измеренных значений G и изменений длительности земных суток с 1985 по 2000 годы нами был произведен спектральный анализ указанных временных рядов и построены соответствующие периодограммы. При расчетах спектральной плотности был применен метод максимальной энтропии (ММЭ) и алгоритм Бурга. На рис. 117 приведены периодограммы с выделенными гармониками в вариациях G и изменениях длительности суток.

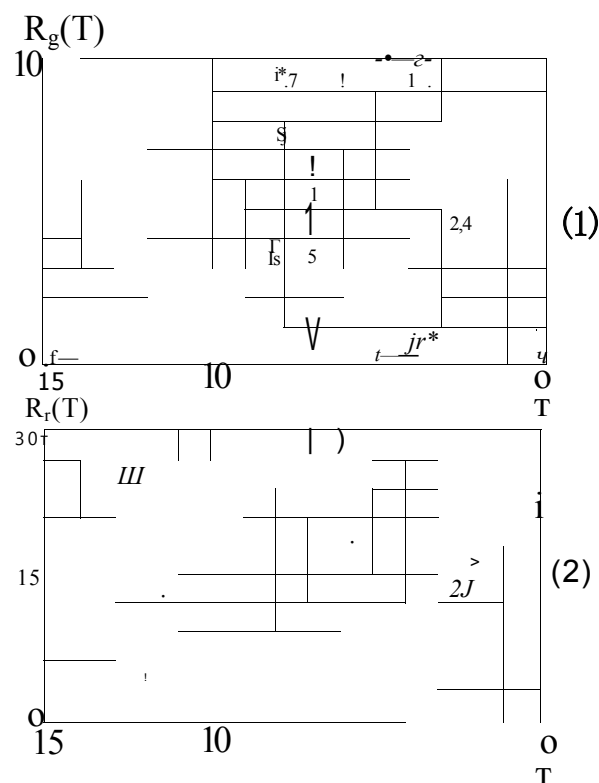


Рис. 117. Периодограммы вариаций измеренных значений G и изменений длительности суток

(1) - периодограмма вариаций G ; (2) - периодограмма изменений длительности суток; T - период

Как видно из приведенных периодограмм, во временных вариациях измеренных значений G выделяются две ярко выраженные гармоники с периодами 2,4 и 7,7 лет. В то же время на периодограмме изменений длительности суток наиболее ярко проявились гармоники с периодами 2,3 года и 12,4 лет. Наличие этих гармоник подтверждается и при анализе графиков на рис. 119.

Сравнение периодограмм позволило установить наличие идентичной для обоих спектров и ярко выраженной гармоники с периодом 2,3-2,4 года.

Примечательно, что гармоника с периодом 12,5 лет была выделена в вариациях длительности суток В.М. Киселевым (1980). Эта гармоника, по мнению Киселева, указывает на наличие связи изменений длительности суток с 11-летним циклом солнечной активности.

Как уже было описано выше, при прохождении гравитационной волны через Землю ее форма будет претерпевать очень сложные изменения. Помимо изменений формы Земли, описанных выше, нам хотелось бы привести пример изменений напряжений и формы Земли в случае, когда наблюдатель смотрит на Землю по направлению распространения гравитационной волны. Реакция формы Земли на падающую гравитационную волну, распространяющуюся перпендикулярно плоскости чертежа, показана на рис. 118.

Как видно из рис. 118, при прохождении гравитационной волны через Землю она будет подвергаться весьма сложным деформациям. Если же учесть вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца и движение Солнечной системы в Галактике, то становится ясно, насколько сложным динамическим напряжениям подвергается тело Земли. В проявлениях геодинамических процессов необходимо учитывать, «что наша планета представляет открытую систему, существующую не в абстрактном, а в конкретном космическом пространстве и взаимодействующую

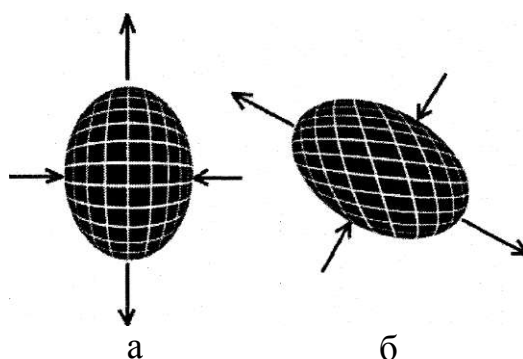


Рис. 118. Изменение направлений деформационных напряжений в Земле в поле гравитационной волны, распространяющейся перпендикулярно плоскости чертежа

а - деформация Земли при прохождении первой полуволны; б - деформация Земли при прохождении второй полуволны

щую с ним. Достаточно давно было обращено внимание на совпадение длительности крупномасштабных тектонических циклов, установленных еще в самом конце XIX века французским геологом М. Бертраном, со временем обращения Земли и всей Солнечной системы по галактической орбите» (Хаин, 2001).

Если период вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, значительно меньше периода гравитационной волны, то, очевидно, что даже при прохождении одной полуволны, Земля будет подвергаться знакопеременным напряжениям с суточным и годовым периодом, но эти напряжения будут относительно незначительными.

Конечно, при смене полупериодов гравитационной волны знакопеременные напряжения в Земле должны быть существенно выше, чем в результате ее вращения вокруг оси и вокруг Солнца в поле падающей волны.

Для лучшего понимания механизма влияния гравитационной волны на изменения угловой скорости ее вращения рассмотрим пример прохождения гравитационной волны через Землю. Так, при прохождении первой гравитационной полуволны через Землю радиус Земли несколько увеличится по направлению распространения волны и уменьшится перпендикулярно ему. Это приведет к изменению момента инерции Земли, причем знак этого изменения будет зависеть от ориентации Земли по отношению к фронту гравитационной волны. При прохождении центральной части гравитационной полуволны через Землю ее форма будет максимально деформирована, и момент инерции будет максимально отличаться от среднего значения. Следовательно, в это время изменения длительности суток будут максимальными.

В момент перехода от одного полупериода гравитационной волны к другому воздействие на Землю гравитационной волны будет минимальным ~ 0 . В этот момент Земля примет свою естественную форму, и длительность суток будет иметь среднее значение. При вступлении второй полуволны значение момента инерции Земли начнет меняться на противоположное по знаку. Значение достигнет максимальной величины при прохождении в центральной части гравитационной полуволны, когда ее амплитуда будет максимальной. Это приведет к максимальному, но противоположному по знаку, изменению длительности земных суток. Затем цикл будет повторяться. Таким образом, описанный механизм может объяснить волновое изменение длительности суток, хорошо коррелирующееся с изменениями волновых вариаций измеренных значений G . Некоторые отклонения от описанного механизма могут быть объяснены сложным характером изменений формы Земли при прохождении фронта гравитационной волны, в результате ее вращения вокруг оси и вокруг Солнца, а также в результате наложения гравитационной волны второго порядка GW_2 .

Особый интерес представляет сравнение графиков вариаций длительности земных суток и сейсмической активности Земли (рис. 119).

Как видно из рис. 119, максимумы всех циклов сейсмической активности Земли полностью совпали с максимумами вариаций длительности земных суток.

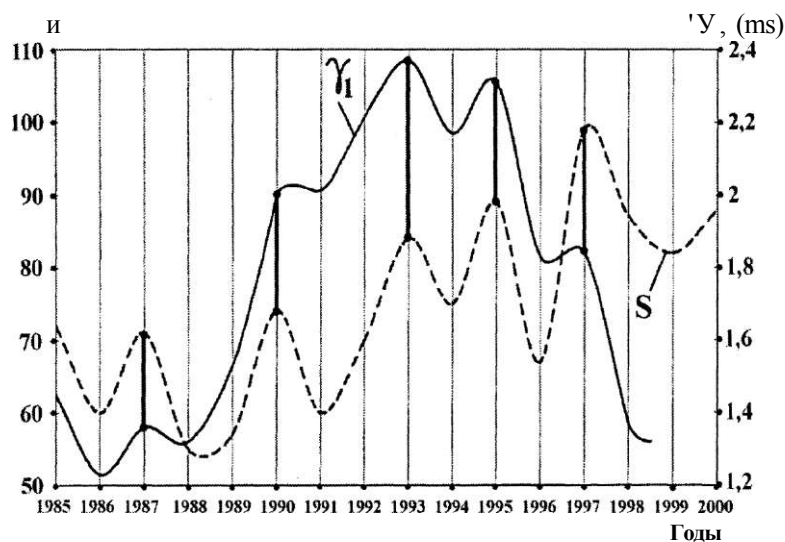


Рис. 119. Сравнение графиков вариаций длительности земных суток и сейсмической активности Земли

Ось γ_1 - усредненное за год число землетрясений с $M/5$; ось $y, (ms)$ - изменения длительности земных суток в ms ; y , - график вариаций длительности земных суток; S - график сейсмической активности Земли

Спектральный анализ вариаций длительности земных суток и сейсмической активности Земли также подтвердил наличие идентичных гармоник в обоих процессах (рис. 120).

На рис. 120 показано сравнение периодограмм сейсмической активности Земли и вариаций длительности суток. Как видно из сравнения, на обеих периодограммах выделились по две гармоники с периодами 2,3-2,6 года и 11,2-12,4 лет. Таким образом, периодограммный анализ подтвердил результаты линейного преобразования методом скользящей средней временных рядов сейсмической активности и вариаций длительности суток Земли.

Физический смысл этого абсолютного совпадения становится понятен, если учесть, что при построении графика сейсмической активности были использованы землетрясения с $M/5$, данные о которых взяты из каталога <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2001/081.pdf>.

При этом необходимо отметить, что более 95% всех использованных землетрясений с $M > 5$ относятся к поясам сжатия Земли и, следовательно, отражают активизацию процессов сжатия. В то же время квадрупольный характер влияния гравитационной волны предполагает одновременное расширение Земли перпендикулярно оси сжатия.

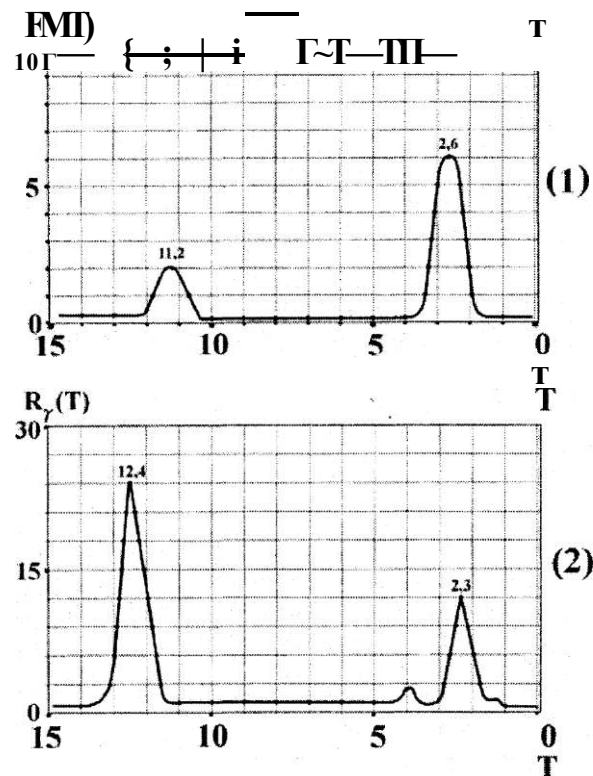


Рис. 120. Периодограммы сейсмической активности Земли и изменений длительности суток

(1) - периодограмма сейсмической активности Земли; (2) - периодограмма вариаций длительности суток; T - период

Таким образом, анализируя взаимосвязь графиков S и y_2 на рис. 120, можно прийти к выводу, что периоды повышения сейсмической активности, отражают процессы сжатия Земли в одном направлении, в то время как расширение происходит в противоположном направлении и не проявляется столь ярко в сейсмической активности поясов растяжения Земли в силу малочисленности и слабости землетрясений рифтовых зон.

Изменяющийся при этом момент инерции приводит к замедлению скорости вращения Земли (увеличению длительности суток). Необходимо учесть, что знак изменения момента инерции и, как следствие, длительности земных суток, будет зависеть от ориентации оси вращения Земли по отношению к фронту гравитационной волны.

Приведенные результаты исследований позволяют подтвердить выводы авторов настоящего труда о том, что основной причиной наблюдаемых изменений

длительности суток является периодическое и сложное изменение радиуса и формы Земли.

4.7. ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЗЕМЛИ

О возможности влияния гравитационных волн на деформацию Земли и геодинамические процессы можно судить на основе проведения определенных аналогий, например, влияния лунно-солнечных приливов, а также гравитационного воздействия других планет Солнечной системы на природные процессы.

Изучению связи между периодичностью землетрясений и лунно-солнечными приливами посвящены исследования П.С. Матвеева и В.Г. Голубицкого; М.В. Стоваса и П.Г. Нестеренко; Б.В. Ермакова и др.; Л.А. Латынина и С.Д. Ризаева; L.A. Cotton; D.P. Bagby; M.A. Gougenheim; P. Hedervari; L. Knopoff; I.F. Simpson; A. Ryall; B.D. Zeltler; S. Shilen; K. Nagasawa; Th.H. Heaton.

Всеми вышеперечисленными исследователями делается вывод о существовании физической связи между лунно-солнечными приливами и сейсмической активностью Земли. Различаются лишь оценки степени этого влияния.

А.И. Елькин рассматривает возможность влияния лунно-солнечных приливов на скорость процесса тектонических движений земной коры и, как следствие, на возникновение землетрясений. В работе Л.А. Латынина и С.Д. Ризаева предлагается изучать приливные деформации в зонах сейсмоактивных разломов с целью прогноза землетрясений. В частности отмечается, что, если в результате процессов, подготавливающих землетрясение, упругие характеристики зоны разлома изменяются, это приводит к изменению интенсивности приливной волны.

Привлекает внимание несколько нестандартный подход Н.П. Булатовой (2005) к проблеме влияния положений Солнца и Луны на широтное распределение сейсмичности Земли. В частности, ею обнаружены аномально высокие значения сейсмичности в узких полосах широт, соответствующих по своему положению границам внешнего ядра с мантией и внутренним ядром, спроектированным на поверхность Земли по направлениям, перпендикулярным оси вращения Земли. Полученные результаты показали, что Солнце и Луна при своем пространственно-временном движении создают сложную модуляцию в тонкой структуре сейсмичности, проявляющуюся в гистограммах и спектрах распределения сейсмичности по широте.

П.С. Матвеев и В.Г. Голубицкий, проводя статистические исследования влияния приливообразующих сил Луны и Солнца на частоту землетрясений Закавказья, дают оценку зависимости частоты землетрясений от смены фаз Луны и от смены времени года. В то же время ими исключается статистически достоверная связь между солнечными приливами и частотой землетрясений.

D.P. Bagby на основании изучения величины высвобожденной за 65 лет энергии приходит к заключению о влиянии расположения Нептуна и Урана по отношению к Земле, а также лунно-солнечных приливов на сейсмическую активность.

Ряд авторов (Th.H. Heaton, L. Knopoff, I.F. Simpson) считают, что приливы являются спусковым механизмом разрядки напряжений в недрах Земли. Ими также отмечается возможность применения зависимостей между сейсмичностью и приливными явлениями для прогноза землетрясений.

K. Nagasawa на основании изучения землетрясений Японии с 1926 по 1970 гг. установил, что для землетрясений с $M > 6$ наблюдается нарастание частоты более чем на 30% во время первой и последней четвертей Луны.

A. Ryall и другие указывают на возможность возбуждения микроземлетрясений земными приливами.

I.F. Simpson (1967, 1968) предлагает к рассмотрению физический механизм влияния на период повторяемости землетрясений лунно-солнечных приливов, связанный с пересечением плоскости эклиптики с нормалью к плоскости разлома при землетрясениях.

В своих работах В.М. Федоров (2007) приходит к ряду интересных выводов: во-первых он впервые пришел к интересному выводу о возможной связи вулканической активности с положением Земли на своей орбите); во-вторых, исследователь приходит к заключению, что приливное действие Луны, Солнца и ближайших планет Солнечной системы вызывает деформацию литосферы, влияющую на изменения угловой скорости вращения Земли, хронологическую структуру и вероятностные характеристики вулканических извержений.

Безусловно, для более глубокого анализа воздействия гравитационных полей планет Солнечной системы на природные процессы Земли необходимо осмыслить возможный физический механизм этого процесса.

Рассмотрим этот процесс на примере Луны, гравитационное воздействие на Землю которой хорошо изучено (рис. 121). Итак, в поле гравитационного потенциала передача момента количества движения от планеты к спутнику должна уравниваться моментом вращения, обусловленным влиянием спутника на планету. Если бы приливная реакция спутника на планету была бы мгновенной, то полный момент вращения оказался бы равным нулю, поскольку приливный горб был бы всегда симметричен относительно линии планета-спутник.

Между тем в силу неабсолютной упругости и диссипации энергии будет иметь место фазовый сдвиг φ . Так как $\sigma_{пл} > \sigma_{сп}$, максимальный приливный горб у планеты отстает от линии планета - спутник. Спутник, в свою очередь, создает противодействующий момент, стремящийся замедлить вращение планеты. В то же время воздействие горба на спутник создает равный по величине, но противоположный по направлению момент вращения, вызывающий увеличение энергии и момента количества движения спутника.

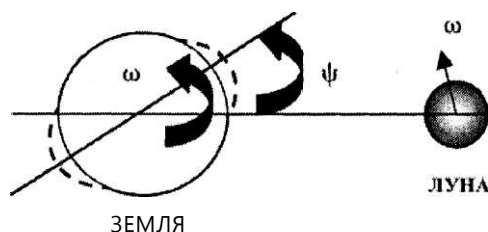


Рис. 121. Схема запаздывания приливного горба, возникающего у Земли под влиянием гравитационного поля Луны

$\omega_{\text{пл}}$ - частота вращения планеты вокруг своей оси; $\omega_{\text{сп}}$ - частота вращения спутника вокруг планеты

Энергия вращения, затрачиваемая спутником на торможение Земли, составляет величину $2,8 \cdot 10^{19}$ эрг/с. Для сравнения: Земля получает от Солнца энергию $1,7 \cdot 10^{24}$ эрг/с, мощность атмосферной циркуляции оценивается $2,4 \cdot 10^{22}$ эрг/с, энерговыделение во время мощных магнитных бурь составляет около 10^{19} эрг/с.

Расчеты показывают, что основная часть замедления вращения Земли, составляющая около 3,5 мс за столетие, обусловлена океаническими приливами (на самом деле замедление составляет около 2 мс, поскольку одновременно происходит ускорение вращения Земли примерно на 1,5 мс за столетие, причины которого до настоящего времени не выяснены).

Из-за того, что Земля вращается вокруг своей оси быстрее, чем Луна обращается вокруг Земли, приливный выступ (горб) выносится вращением Земли вперед относительно линии центров Земли и Луны. Наоборот, если бы Земля вращалась медленнее обращения Луны, то приливный горб отставал. Максимальная деформация в результате лунных приливов в данной точке возникает позже, чем максимальное напряжение, направленное вдоль линии центров (Марков, 1986). Земные приливы запаздывают на угол $\approx 2-4^\circ$.

Максимальная амплитуда приливного горба составляет несколько десятков см (Жарков, 1983).

Приливообразующий потенциал W_b произвольной точке A (рис. 122), расположенной на поверхности Земли, имеет вид:

$$W_t = \frac{GM}{R} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^n P(\cos z), \quad (4.31)$$

где G - гравитационная постоянная, M - масса возмущающего тела (в данном случае, масса Луны), a - средний радиус Земли, R - расстояние между центрами

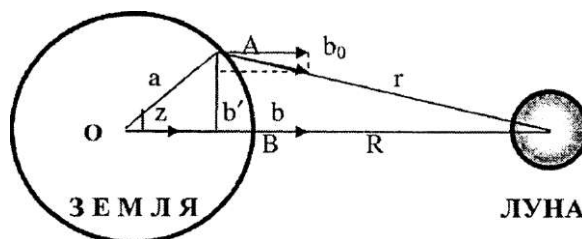


Рис. 122. Приливная сила в точках А и В (Жарков, 1983)

масс Земли и Луны, z - угол АОВ, $P_n(z)$ - полиномы Лежандра. Поскольку отношение: a/R весьма мало ($\sim 1/60$), в общей формуле достаточно удержать всего один член с $p=2$. Изменение ускорения силы тяжести на поверхности Земли в точке В, лежащей на линии центров Земля-Луна (где $z=0$), из-за приливообразующей силы равно (Жарков, 1983):

$$Ag_t = \frac{dW_t}{da} \frac{2GM_L a}{R^3} P_2(l) = 1,110 \cdot 10^{-4} \text{ см/с}^2 = 0,1 \text{ мГал}, \quad (432)$$

где Ag_t - изменение ускорения силы тяжести; M_L - масса Луны.

Для количественной характеристики отклика твердой Земли на прилив Ляв в 1909 г. ввел два безразмерных параметра k и h - числа Лява. Число k равно отношению дополнительного потенциала, возникающего из-за приливной деформации Земли, к приливообразующему потенциалу на поверхности Земли; число h - отношению высоты земного прилива к высоте соответствующего статического океанического прилива на абсолютно твердой Земле (т.е. к высоте подъема эквипотенциальной поверхности абсолютно твердой Земли под действием приливообразующего потенциала).

Значения чисел Лява для полусуточных или суточных волн равны:

$$k = 0,301; h = 0,609.$$

Рассмотрев механизм приливообразования, вызванного Луной в твердой Земле, попытаемся оценить изменение ускорения силы тяжести в результате влияния гравитационного поля Марса в период его максимального приближения к Земле на расстояние 55,7 млн. км, которое состоялось 27-28 августа 2003 г.

На рис. 123 показана схема взаимодействия Земли и Марса, где R - расстояние от центра Земли до центра Марса, g - расстояние от центра Марса до поверхности Земли.

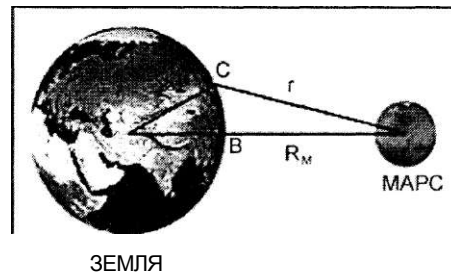


Рис. 123. Схема гравитационного взаимодействия Земли и Марса

Определим изменение ускорения силы тяжести на поверхности Земли в точке В, лежащей на линии центров Земля-Луна, где $z=0$.

$$g^t - \frac{2GM_M a}{R^3} \sim \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-8} \cdot 6,4 \cdot 10^{26} \cdot 6,37 \cdot 10^8}{(56 \cdot 10^{12})^3} \sim$$

$$= 3,1 \cdot 10^{-42} \text{ см/с}^2 \text{ (Гал)} = 0,3 \cdot 10^{-7} \text{ мГал}, \quad (4.33)$$

где G - гравитационная постоянная; M_M - масса Марса ($6,4 \cdot 10^{26}$ гр); a - радиус Земли ($6,37 \cdot 10^8$ см); R - минимальное расстояние от Земли до Марса ($56 \cdot 10^{12}$ см).

Таким образом, исходя из полученного результата, можно сделать вывод о том, что изменение ускорения силы тяжести под влиянием гравитационного поля Марса составляет $0,3 \cdot 10^{-7}$ мГал, что может привести, по предварительным оценкам, к изменению эксцентриситета в твердой Земле всего лишь на сотые доли миллиметра. Между тем в атмосфере, как в более динамичной среде, деформация может иметь более значительные последствия, в особенности в верхних слоях атмосферы, где влияние гравитационного поля Земли ослабляется пропорционально квадрату расстояния. В результате этого воздействие гравитационного поля Марса на верхние слои атмосферы ожидается более ощутимым, что может привести к нарушению существующего баланса в циркуляции атмосферы и, как следствие, к различным атмосферным аномалиям, выраженным в климатических изменениях и в виде природных катаклизмов - сильных ураганов, тайфунов, наводнений и т.д. Между тем нарушение атмосферной циркуляции, в свою очередь, оказывает влияние на процессы в геосфере и гидросфере. Изменения зон повышенных и пониженных давлений в атмосфере играют не последнюю роль в качестве спускового крючка, в активизации землетрясений и извержений вулканов. В момент приближения Марса его легко разглядеть и сфотографировать даже с помощью небольших телескопов (рис. 124).

Так, Марс сближается с Землей примерно каждые два года. Из-за эксцентриситета орбиты Марса его расстояние от Земли в момент противостояния мо-

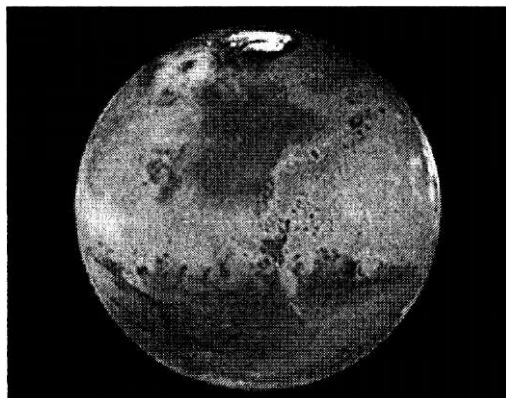


Рис. 124. Фотография Марса (<http://www.kao.re.kr/space/SSolar%20system/image/mars.jpg>)

жет меняться от 56 до 100 млн. км. Противостояния, при которых расстояние до Марса не превышает 60 млн. км, принято называть великими. В период великих противостояний Марс находится вблизи перигелия. Если соединить перигелий орбиты Марса с Солнцем прямой линией, то она пересечет орбиту Земли в той точке, которую Земля проходит обычно в период от конца июля до начала сентября. Например, в 2003 г. это произошло 28 августа. Великие противостояния следуют с интервалом 15 или 17 лет. Между тем, самые великие противостояния, при которых Марс подходит к Земле на расстояние около 56 млн. км, происходят примерно раз в 60 тыс. лет. Таким образом, противостояние Марса, которое произошло 28 августа 2003 года, относится к самым великим. Между Землей и Марсом расстояние составило всего около 55,7 миллионов километров, тогда как обычно он бывает от Земли на расстоянии около 400 миллионов километров.

Исторически сложилось мнение, что приближение Марса к Земле вызывает различные беды - засухи или, наоборот, наводнения, ураганы, тайфуны, землетрясения. Но наука должна основываться на проверенных фактах. Интересно, что и сейчас существует немало различных толкований весьма детальных фотографий поверхности Марса. Некоторые энтузиасты по-прежнему склонны мистифицировать Марс, разглядывая на его поверхности пирамиды или причудливые изображения, напоминающие лица людей (рис. 125).

Между тем, хочется напомнить, что и на Земле достаточно много причудливых форм в рельефе, в которых, при хорошей фантазии и желании, можно разглядеть лица людей и изображения животных. Ведь именно так и рождались многие древние легенды и мифы. Что же касается правильных форм образований, напоминающих пирамиды, то и на Земле немало подобных структур, например, в Гималаях, которые, кстати, тоже пытаются мистифицировать. Эти формы придали геологическим образованиям природа в результате эрозии и других процессов.

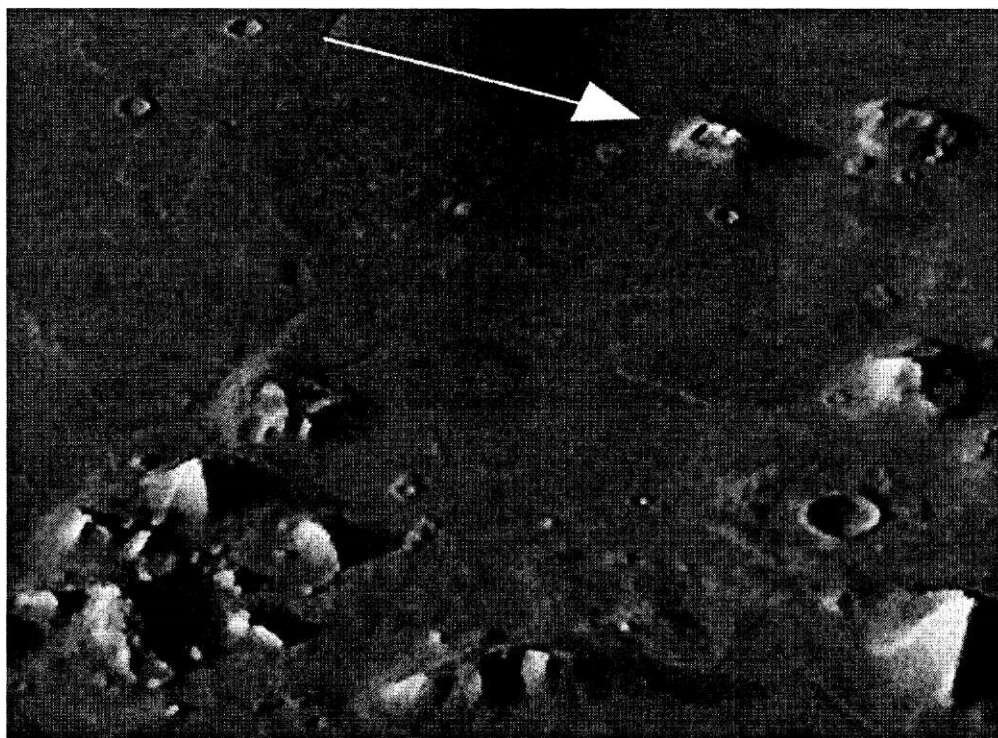


Рис. 125. Детальная фотография поверхности Марса, на которой хорошо видны причудливые природные образования, похожие на пирамиды и даже на лицо человека (<http://unexplained.chat.ru/mars/cityandface2.jpg>)

Нам хотелось бы остановиться на двух моментах. Первый - исторический. Если существует поверье, что Марс приносит беды, то нельзя голословно отметить эту информацию. Лучше во всем разобраться с точки зрения современной науки. Как говорится, «нет дыма без огня». Почему катастрофы приписывают именно Марсу, а не другим планетам, несмотря на то, что периодически происходят парады планет или сближения с Землей других планет Солнечной системы.

Второй аспект - физический. Марс - одна из планет Солнечной системы, взаимодействующая со всеми другими планетами своим гравитационным полем. Его приближение к Земле почти в семь раз не может бесследно пройти для геофизических и метеорологических процессов.

Мы хотели бы акцентировать внимание читателей на конкретных фактах. Приведем несколько самых ярких примеров природных катастроф с июля по сентябрь 2003 года, когда Марс был в зоне максимального гравитационного взаимодействия с Землей.

Начавшийся 23 июля над Филиппинами чудовищный тайфун «Имбудо», унесший жизни 17 человек и оставивший без крова 11 тысяч человек, 24 июля

пронесся по южному побережью Китая, нанеся огромный ущерб. В поперечнике ураган достигал 800 км, а его скорость в порывах составляла 160 км/час.

Пронесшийся над Ростовом 12 августа ураган разрушил 5 поселков, а 3 сентября на юге Китая бушевал мощнейший тайфун, «Дуцзюань», унесший жизни более 30 человек.

Мощный тайфун Майеми, двигавшийся со стороны Японии, где погиб 1 человек и около сотни было ранено, достиг Кореи поздно вечером 12 сентября. Согласно данным метеорологов, максимальная скорость ветра внутри тайфуна достигала 60 м/сек. Вихрь разрушил все, что попало на его пути. Рухнули на Землю несколько гигантских подъемных кранов, на берег был выброшен пришвартованный к порту океанский лайнер, множество кораблей было потоплено. Сотни зданий было уничтожено, около 10 тысяч человек осталось без крова.

Ураган «Изабель» обрушился 18 сентября на восточное побережье США, скорость ветра достигала 40 метров в секунду. Множество погибших и раненных, прервано авиасообщение, закрыты 19 аэропортов, более 2 миллионов потребителей в штатах Северная Каролина и Вирджиния остались без электричества. Президентом США эти штаты были объявлены зоной бедствия.

29 сентября сильнейший ураган, пронесшийся над Украиной, оставил без света всю Западную Украину.

Список можно было бы существенно увеличить, но думаем, что и этих примеров достаточно. По статистике, с июля по конец сентября в Море произошло вдвое больше ураганов и тайфунов, чем за аналогичные периоды прошлых лет.

Значительное повышение сейсмической активности на всей планете было отмечено со второй половины сентября 2003 г.

Так, 17 сентября происходит землетрясение в Чили магнитудой $M=6,1$; 21 сентября с $M=6,7$ на юге Бирмы; 22 сентября с $M=6,5$ землетрясение в Доминиканской Республике; 24 сентября с $M=5,2$ в Турции; 25 сентября два сильных землетрясения с магнитудами 8 и 7 в Японии; 27 сентября сильные землетрясения с $M=7,5$ и $6,5$ в Южной Сибири.

Наконец, 24 сентября одновременно начинается серия сильнейших извержений группы вулканов на Камчатке - сначала Карымского, а затем, 26 сентября, и Безымянного, 30 сентября два землетрясения с $M=6,5$ и 6 в Новой Зеландии, 1 октября - землетрясение на Алтае с $M=6,6$.

Как видно из краткого обзора, наблюдается ярко выраженная аномально высокая активность как атмосферных, так и геологических катаклизмов. Степень активности атмосферных проявлений энергетики планеты (тайфуны, ураганы) и геологических (землетрясения, вулканы) превышает фоновые значения, примерно в 2,5-3 раза. Между тем не трудно заметить, что сначала активизируются атмосферные процессы, а затем, когда уже наблюдается спад степени их активности, начинается активизация геодинамических процессов.

Приближение Марса к Земле - это не мгновенный, а постепенный процесс, следовательно, и усиление его гравитационного влияния на Землю происходит

постепенно. Если Марс приблизился к Земле в 7 раз, то, исходя из закона всемирного тяготения, гравитационная сила Марса, воздействующая на Землю увеличилась в этот период в 49 раз!

Что же при этом происходит? Как известно, гравитационное поле, в отличие от магнитного и электрического, воздействует на тела и пространство по-особенному. Т.е. при приближении Марса к Земле она начинает деформироваться - Земля начинает вытягиваться с противоположных сторон по линии, соединяющей центры Земли и Марса, и сжиматься в перпендикулярном направлении.

Однако этому процессу подвержена не только твердая составляющая Земли, но и атмосфера, а также гидросфера (Мировой океан). Причем атмосфера, являясь менее плотной и более мобильной и чуткой к внешним воздействиям средой, начинает реагировать на приближение Марса значительно раньше. Именно поэтому атмосферные аномалии, выразившиеся в виде тайфунов и ураганов, начали проявляться значительно раньше, еще в июле 2003 года. Гравитационное поле Марса нарушило существующий баланс атмосферной циркуляции, более того, если бы мы смогли увидеть атмосферу Земли из космоса, то можно было бы заметить, как она деформирована под действием поля гравитации Марса.

Земная кора является твердой средой, и процессы, протекающие в ней, более инертны. Гравитационное поле Марса привело к перераспределению энергии в земной коре и нарушило геодинамический баланс, добавив в общую «энергетическую копилку» и свою немалую долю. Это вывело из состояния равновесия очаги землетрясений, напряжения в которых находились на критическом уровне. В любом случае, по среднемесячным прогнозам сейсмической активности, которые выполняются в НИИ по прогнозу и изучению землетрясений, в начале октября 2003 г. должен был бы начаться очередной трехмесячный цикл сейсмической активности. Но Марс, с одной стороны, ускорил наступление этого цикла, с другой - существенно усилил его амплитуду.

Таким образом, проведя предварительные общие оценки возможности влияния гравитационного поля планет Солнечной системы на климатические и геодинамические процессы на примере Луны и Марса, мы приходим к следующим выводам.

Наибольшее влияние на формирование атмосферного и геодинамического режима планеты оказывает воздействие гравитационного поля Луны. В то же время гравитационное взаимодействие Земли и Луны представляет собой, с точки зрения энергообмена, единую систему, формирующую естественные ритмы климатических и геодинамических процессов. Взаимное влияние как Земли на Луну, так и обратный процесс необходимо рассматривать как часть естественного сосуществования двух элементов единой системы. Поэтому взаимные деформации Земли и Луны под действием приливных сил, вызывающие цикличность атмосферных и сейсмических процессов, так же естественны, как и смена дня и ночи или времен года.

Как показали расчеты, с точки зрения мгновенного выделения энергии приближение Марса не является столь выдающимся событием. Но если учесть, что эта часть гравитационной энергии привносилась в общую энергетику Земли в течение нескольких месяцев (период приближения и удаления Марса), то привнесенная часть энергии значительно возрастет и превысит энергию, привносимую Луной во время приливов. Т.е. если лунные приливы не вносят дополнительную энергию в систему Земля-Луна, то марсианский прилив, длящийся несколько месяцев, привносит в систему Земля-Луна дополнительную порцию значительной энергии.

Этот процесс можно рассматривать как своеобразную «накачку» атмосферы и твердой Земли гравитационной энергией, привнесенной Марсом, что может стать причиной нарушения сложившегося энергетического баланса системы Солнце-Земля-Луна, в первую очередь нарушение циркуляции в атмосфере Земли, которое, в свою очередь, вызывает нарушение хода естественных геодинамических процессов. Именно этим можно объяснить тот факт, что атмосферные процессы начинают реагировать на приближение Марса раньше, после чего начинаются геологические катаклизмы.

В принципе гравитационное взаимодействие Марса с Землей в периоды великих противостояний, так же как и других планет, представляет собой один из элементов функционирования Солнечной системы. Эти процессы происходят с определенной периодичностью, но с большим периодом, по сравнению с длительностью человеческой жизни, в связи с чем они психологически воспринимаются как артефакты. Если бы лунные приливы в океане происходили с периодичностью 50 или 100 лет, то они воспринимались бы как глобальные природные катаклизмы, при которых затопливаются колоссальные площади суши. Но океанские приливы никого не пугают, а воспринимаются как естественный элемент бытия.

Поэтому при рассмотрении природных катастроф немалое значение имеет фактор чисто психологического восприятия того или иного природного явления по отношению к жизнедеятельности людей.

Так, например, если процесс затопления территорий растянут во времени по сравнению с длительностью человеческой жизни, то он не будет восприниматься в качестве природного катаклизма, несмотря на то, что его масштабы могут быть значительно больше, чем при быстром затоплении. В то же время с геологической точки зрения процесс длительного, но более масштабного затопления может быть рассмотрен в качестве глобальной природной катастрофы.

В качестве примера можно привести некий природный катаклизм, выразившийся в изменении климата и вызвавший гибель динозавров и многих других форм жизни на всей планете в меловой период. В последующем на Земле сформировались новые, близкие к нам, формы жизни. Таким образом, в это время действительно произошла некая глобальная катастрофа, вызвавшая серьезные изменения в биосфере Земли. Человечество не может знать, является ли данный этап жизни на Земле периодом очередного катаклизма, растянутого во времени,

или нет. В связи с этим понятие природной катастрофы должно быть привязано к фактору длительности человеческой жизни, по отношению к которой то или иное явление может быть рассмотрено в качестве катастрофического. Данная проблема имеет психологическую и философскую основу.

В то же время, на наш взгляд, отклонения в климатических и геологических процессах, вызванные приближением Марса, с точки зрения масштабов имеют хоть и выраженное для восприятия людей проявление, но локальный характер с точки зрения геологической масштабности. Так, этот процесс может отражаться в смещении и некотором увеличении амплитуды трехмесячных циклов сейсмической активности, по масштабам проявления занимающим одно из самых низших звеньев в иерархии циклов данного процесса. Можно отметить, что в сейсмической активности нами были выделены двухнедельные циклы.

4.8. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И ЦИКЛИЧНОСТЬ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Вулканизм и сейсмичность являются основными индикаторами современной геодинамической активности. Для исследования возможного влияния сверхдлинных гравитационных волн на активизацию магматических вулканов необходимо представлять себе их роль и место в общей системе геодинамики Земли. На наш взгляд, наиболее полно и детально показывает взаимосвязь различных форм вулканизма с литосферными плитами и их границами схема, составленная Прессом и Зивером, с изменениями Х. Раста (рис. 126).

По нашему мнению, схема на рис. 126 достаточно хорошо отражает процессы вулканизма с точки зрения тектоники литосферных плит и не требует дополнительных комментариев.

В то же время, как уже отмечалось, наиболее масштабными, с точки зрения выделяемой при извержениях энергии, являются магматические вулканы зон субдукции и материковых рифтовых зон. На рис. 127 показано схематическое изображение структуры стратовулкана.

Для исследования возможного влияния гравитационных волн на цикличность вулканической активности нами были сопоставлены графики активности вулканов типа С и вариаций гравитационной постоянной G . При этом для выявления высокочастотных составляющих в вулканической активности временной ряд числа извержений вулканов сглаживался трехлетними скользящими средними.

На рис. 128 приведено сравнение графиков активности магматических вулканов Мира типа С и вариаций гравитационной постоянной G с 1985 по 2000 годы.

Как видно из сравнения, пять из шести циклов вулканической активности (1, 2, 3, 4, 6) полностью соответствуют полному периоду гравитационной волны,

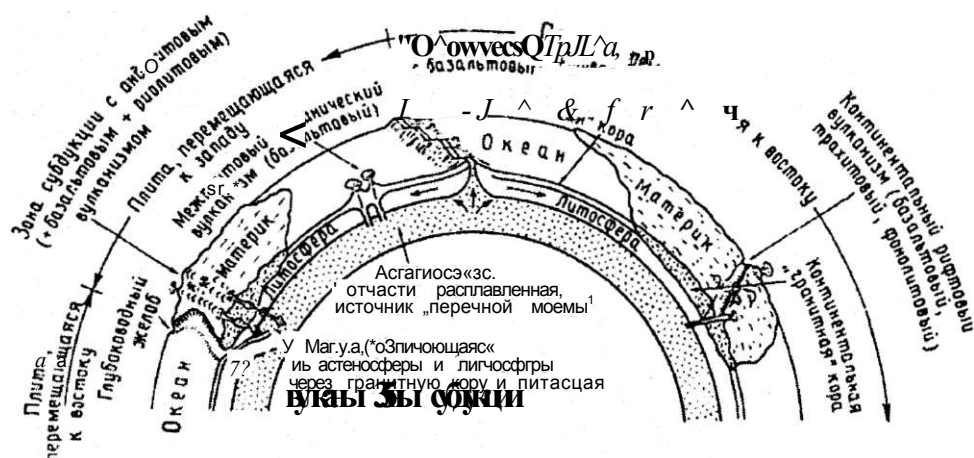


Рис. 126. Взаимосвязи различных форм вулканизма с литосферными плитами и их границами (по Прессу и Зиверу, с изменениями Х. Раста, 1982)

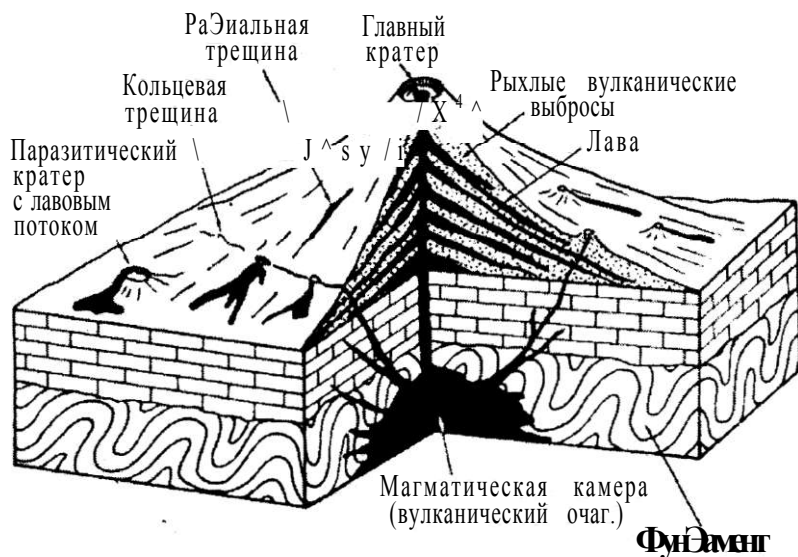


Рис. 127. Схематическое изображение структуры стратовулкана

Эти вулканические постройки широко распространены в зонах субдукции и в материковых рифтовых зонах (по Х. Расту, 1982)

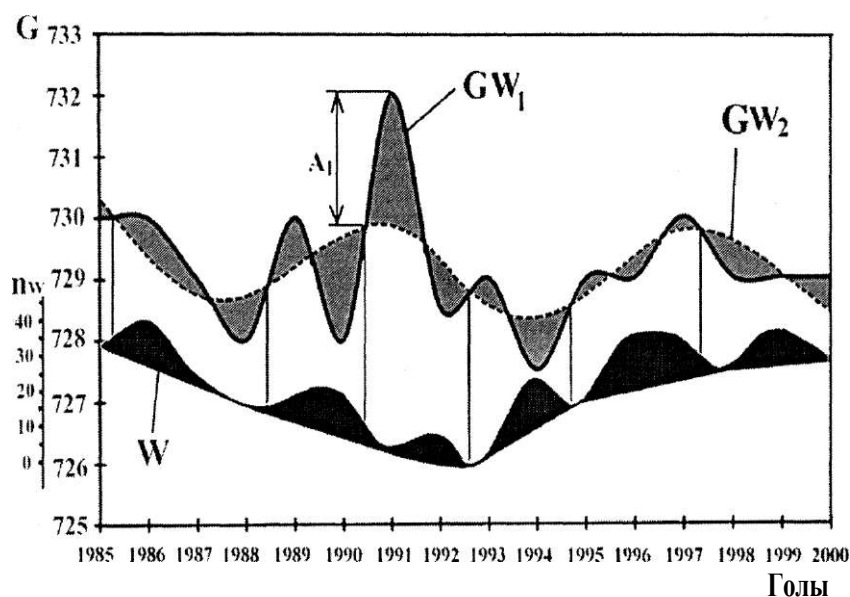


Рис. 128. Сравнение графиков активности магматических вулканов Мира типа С и вариаций гравитационной постоянной G с 1985 по 2000 годы

Ось G - значения гравитационной постоянной начиная со второго знака после запятой; n_w - число извержений магматических вулканов; GW_1 - гравитационная волна первого порядка; GW_2 - гравитационная волна второго порядка; W - график вулканической активности; A_1 - максимальная амплитуда гравитационной волны второго порядка

включающему первую и вторую полуволны. Один цикл вулканической активности (5-й) соответствует трем полуволнам GW_2 , причем именно этот участок графика приходится на 1997 год, т.е. на момент времени, когда коэффициент J_2 резко стал менять характер динамики со снижения на увеличение, что выразилось в смене знака вариаций экваториального и полярного радиусов Земли. Причем период циклов вулканической активности соответствует периоду гравитационной волны первого порядка и составляет в среднем $\sim 2-2,5$ года.

Для более достоверного выявления периода преобладающей гармоник во временном ряду извержений вулканов нами были рассчитаны и построены периодограммы извержений грязевых вулканов методом максимальной энтропии, с использованием алгоритма Бурга.

На рис. 129 приведено сравнение периодограмм вариаций гравитационной постоянной G и извержений магматических вулканов Мира с 1985 по 2000 годы.

Как видно из сравнения, как в вариациях гравитационной постоянной G (гравитационной волны первого порядка), так и в извержениях вулканов выявились идентичные гармоник, с периодами 2,4 года и 2,1 года соответственно.

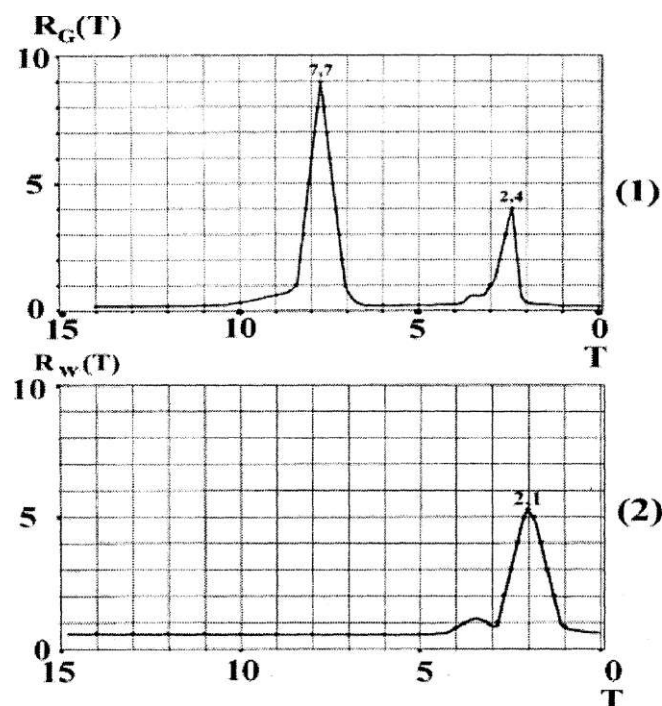


Рис. 129. Сравнение периодограмм вариаций гравитационной постоянной G и извержений магматических вулканов W

(1) - периодограмма вариаций гравитационной постоянной G ; (2) - периодограмма извержений магматических вулканов

На рис. 130 приведено сравнение периодограмм сейсмической и вулканической активности.

Как видно из сравнения периодограмм, на них выделены гармоники с близкими периодами - 2,6 года для сейсмической активности и 2,1 года для вулканической активности. Это свидетельствует о единстве процессов, определяющих цикличность, как сейсмичности, так и вулканизма, несмотря на существующие некоторые различия в их механизмах.

Физический механизм наблюдаемой закономерности можно объяснить следующим образом. Как уже нами отмечалось в случае с сейсмической активностью, как положительная, так и отрицательная фазы гравитационной волны обладают одинаковой по величине, но разной по знаку энергией.

Следовательно, при прохождении через Землю первой и второй полуволн, приводящем к сложным деформациям формы Земли, напряжения в земной коре будут циклически меняться. Они будут возрастать то в одних областях Земли, то в других. Между тем обе фазы вызовут повышение тектонической активности

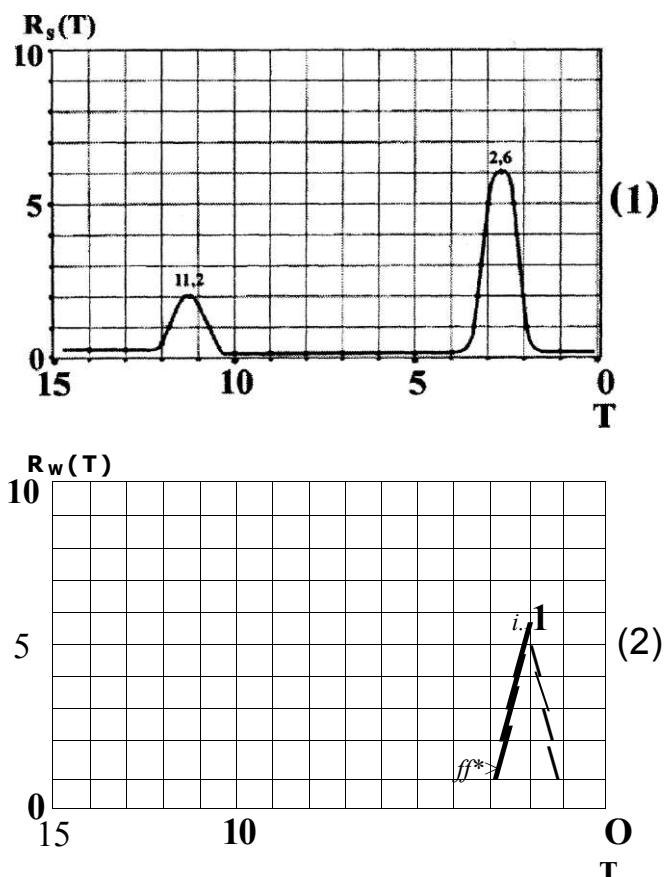


Рис. 130. Сравнение периодограмм вулканической и сейсмической активности

(1) - периодограмма сейсмической активности Земли с 1985 по 2000 годы; (2) - периодограмма вулканической активности Земли с 1985 по 2000 годы

Земли. В то же время извержения вулканов, по сравнению с землетрясениями, представляют собой более инерционный процесс. Землетрясения чувствительнее реагируют на любые изменения напряженного состояния земной коры. То есть при прохождении первого полупериода гравитационной волны напряжения, накопленные в земной коре, оказываются недостаточными для разрыва толщи земной коры и извержения вулканов; между тем прохождение второй полуволны оказывается достаточным, чтобы довести напряженное состояние до критического состояния и сбросить энергию в виде извержений вулканов.

Описанный нами механизм является, безусловно, всего лишь одним из возможных объяснений наблюдаемых закономерностей и должен быть более глубоко обоснован и подтвержден соответствующими расчетами.

4.9. ОТРАЖЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ОСЕЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

В настоящем разделе рассматриваются общие принципы и подход к оценке пространственно-временных изменений осей интегральных напряжений земной коры.

Суть идеи состоит в том, что при прохождении через Землю сверхдлинных гравитационных волн они квадрупольно деформируют ее. Эти деформации будут отражаться в пространственно-временных изменениях осей интегральных напряжений земной коры, что, в свою очередь, должно отражаться на пространственно-временном распределении эпицентров сильных и средних землетрясений и осей напряжений в их очагах.

Эти исследования имеют большое значение для изучения реакции деформационных процессов Земли на прохождение через нее сверхдлинных гравитационных волн. Данные исследования нами подразделяются на два этапа: предварительный и углубленный анализ.

Предварительный анализ представляет собой, по сути, экспресс-анализ общей ситуации в пространственно-временном распределении осей интегральных напряжений в Земле.

При углубленном анализе для решения данной задачи используются оси напряжений очагов сильных и средних землетрясений Мира. Данная глава охватывает первый этап - экспресс-анализ общей ситуации и, частично, второй этап.

Для выяснения общей ситуации в пространственно-временном распределении осей интегральных напряжений в земной коре нами был взят за основу период времени 2 года - с января 1999 г. по декабрь 2000 г.

С этой целью для каждого месяца, в пределах рассматриваемого периода, были составлены карты очагов землетрясений с магнитудой / 5, на которых были выделены геодинамические зоны повышенной сейсмической активности. Все эти зоны совпадают с субдукционными или коллизионными границами литосферных плит, отражающими процессы сжатия Земли, направленные перпендикулярно к простиранию указанных зон. На рис. 131 и 132 приведена схема с изображением помесечного мониторинга выделенных осей интегральных напряжений земной коры, отражающих направление преимущественного сжатия земной коры для каждого месяца за 1999-2000 годы. Вполне логично было бы предположить, что оси интегральных растяжений земной коры будут располагаться перпендикулярно осям сжатия.

Как видно из рис. 131 и 132, оси интегральных напряжений сжатий попеременно меняют свое направление примерно на 90°, причем период этих изменений составляет в среднем три месяца. Внимательный анализ приведенных схем по-

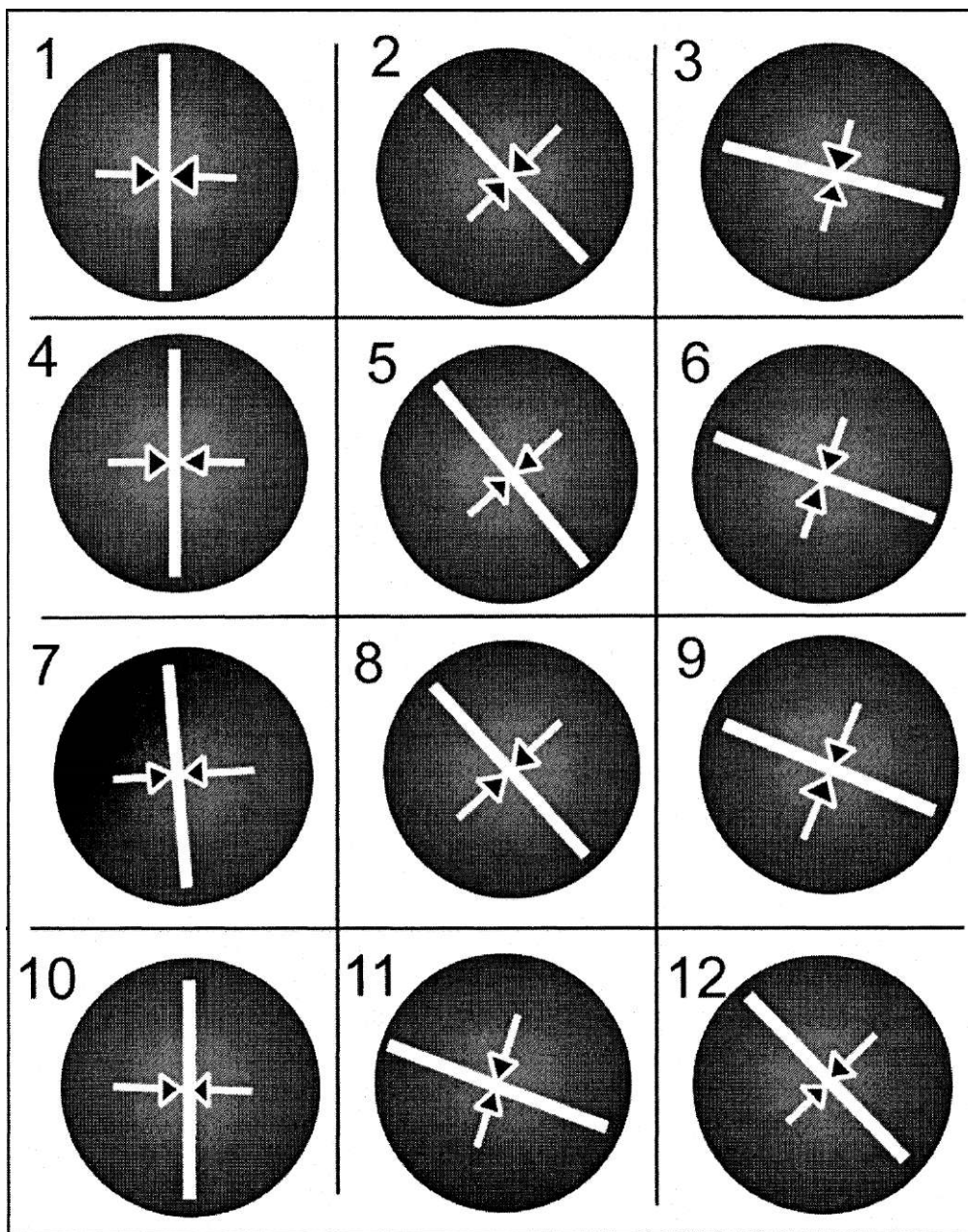


Рис. 131. Схема с изображением помесичного мониторинга выделенных осей интегральных напряжений земной коры, отражающих направление преимущественного сжатия земной коры для каждого месяца за 1999 год

Белые полосы - оси интегральных напряжений сжатия земной коры; стрелки - направления сжатия земной коры; 1, 2... 12 - номера месяцев, начиная с января 1999 года

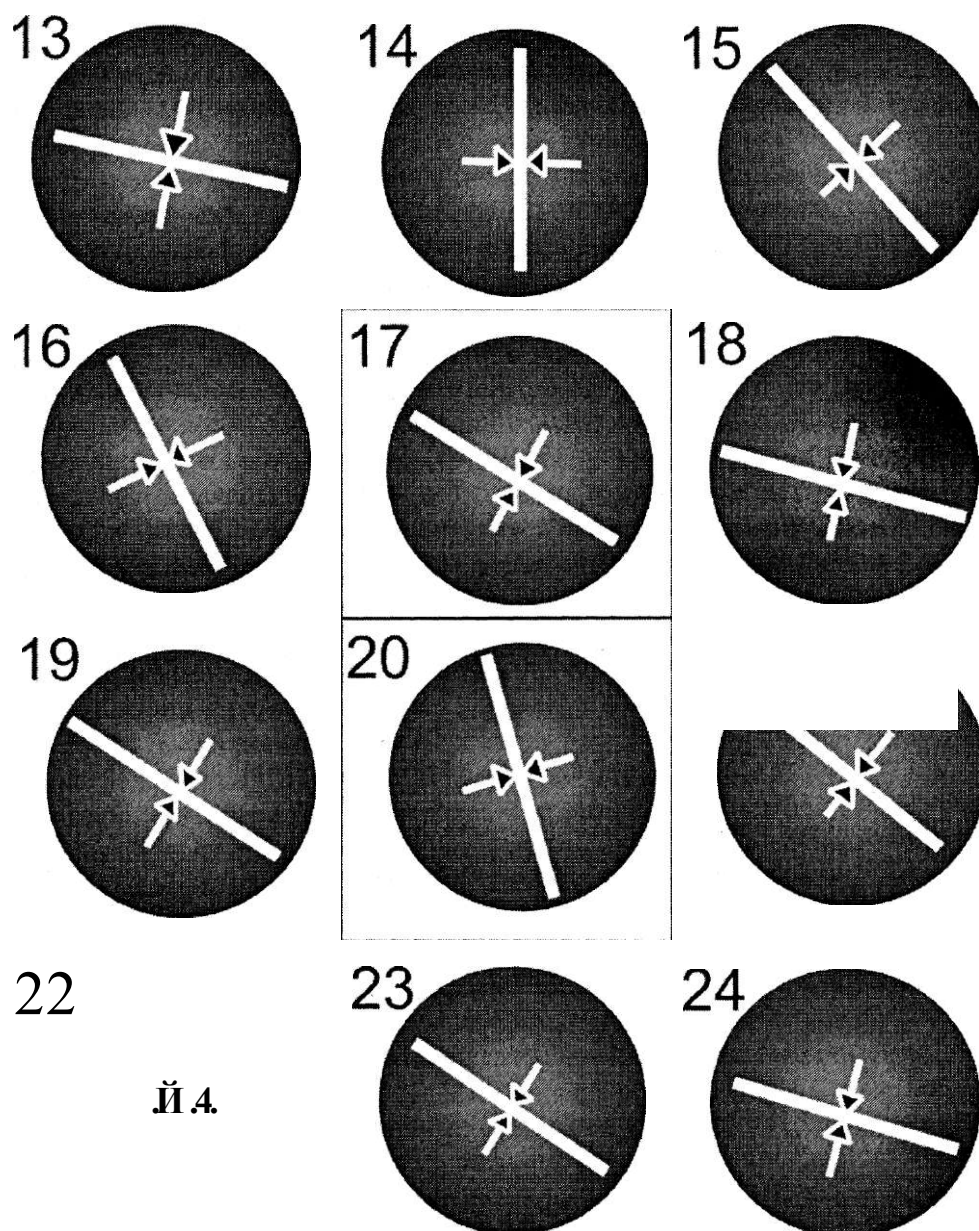


Рис. 132. Схема с изображением помесячного мониторинга выделенных осей интегральных напряжений земной коры, отражающих направление преимущественного сжатия земной коры для каждого месяца за 2000 год

Белые полосы - оси интегральных напряжений сжатия земной коры; стрелки - направления сжатия земной коры; 13...24 - номера месяцев, начиная с января 2000 года (13) по декабрь (24)

месячного мониторинга осей интегральных напряжений земной коры, позволяет прийти к предварительному заключению о том, что Земля подвергается периодической квадрупольной деформации - расширяется в полюсах и одновременно сжимается в экваторе, а затем, наоборот, сжимается в полюсах и расширяется в экваторе.

При этом на рассматриваемых схемах выделены следующие циклы деформаций: 1-3; 4-6; 7-9; 10-13; 14-15; 16-19; 20-21; 22-24 (цифры показывают номер месяца). Полный цикл этих деформаций охватывает период, в среднем 3 месяца.

Эти результаты подтверждают наши предыдущие выводы о квадрупольной деформации Земли в результате прохождения через нее сверхдлинных гравитационных волн.

Учитывая, что космическое пространство непрерывно пронизывают многочисленные гравитационные волны различной длины, можно объяснить наличие в деформациях Земли различных периодов - от десятков лет до нескольких месяцев, взаимное наложение которых создает более сложную картину. Наличие еще более короткопериодных деформаций Земли также можно допустить, однако при этом необходимо иметь в виду, что, чем меньше период гравитационной волны, тем меньшей энергией она обладает, следовательно, тем меньше амплитуда деформаций Земли.

4.10. ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ СГВ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ДЕФОРМАЦИЮ ЗЕМЛИ

Кип Торн (1994) показывает, что при прохождении гравитационной волны через Землю масштабы ее деформации будут весьма незначительны. Между тем, говоря о влиянии сверхдлинных гравитационных волн на квадрупольное изменение напряженного состояния Земли, мы принимаем за основу не столько чисто механическое деформационное влияние СГВ на Землю, сколько ее влияние на изменения пространственной ориентации глубинных энергетических процессов в Земле.

Рассмотрим подробнее предлагаемый нами механизм влияния СГВ на геодинамические процессы. При прохождении СГВ под их действием меняется тензор напряжения в каждой точке пространства среды. Т.е., если некий физико-химический процесс в Земле определенным образом пространственно ориентирован, при прохождении СГВ его пространственная ориентация должна изменяться в зависимости от направления распространения СГВ. Таким образом, изменение пространственной ориентации энергетических процессов в Земле в поле падающей сверхдлинной гравитационной волны приведет к глобальному перераспреде-

лению тектонических напряжений и, как следствие, к изменению формы Земли. Т.е. относительно незначительное, с точки зрения механического воздействия, влияние изменения амплитуды метрики пространства в поле гравитационной волны приведет к изменению пространственного перераспределения внутренней энергетики Земли. Это, в свою очередь, должно повлиять на пространственно-временное изменение геодинамических процессов, вызывающих квадрупольную деформацию Земли. Сверхдлинная гравитационная волна, проходя через Землю, создает в каждой точке пространства энергетический пространственный приоритет (ЭПП) для распределения энергетических потоков атмосферы, гидросферы и твердой среды Земли. ЭПП формируется тензором напряжений в гравитационном поле СГВ в каждой точке пространства в конкретный момент времени.

Фактически гравитационная волна пространственно перераспределяет поток энергии в Земле и околоземном пространстве, затрачивая на это несопоставимо меньшую энергию, чем получаемый при этом эффект. В физике известно множество аналогий, широко используемых в электронике, гидродинамике и других сферах управления и перераспределения электромагнитной или иных видов энергии.

Так, в качестве примера управления большими значениями электрических токов несоизмеримо меньшими затратами энергии можно привести такие приборы, как транзисторы и тиристоры.

В своих исследованиях Н.В. Короновский, А.В. Копаев, И.А. Герасимов и Г.М. Киквадзе приходят к выводу о том, что изменения радиуса Земли в геологическом прошлом могли находиться в пределах 1%. В то же время, авторы указывают, что «на сегодняшний день не существует сколько-нибудь реального физического механизма или механизмов, способных аргументировано объяснить периодическое изменение радиуса Земли (Короновский и др., 2003).

Указанная авторами величина изменений радиуса Земли в пределах 1% превышает 60 км, что существенно выше ожидаемых нами вариаций радиуса Земли, находящихся в пределах от нескольких см (для кратковременных пульсаций от 3 до 100 лет) до первых сотен метров (для пульсаций, имеющих периоды в геологических масштабах времени).

В противном случае пульсации радиуса Земли в десятки километров привели бы к существенным изменениям момента ее инерции, а это, в свою очередь, должно было бы проявиться в ощутимых вариациях угловой скорости ее вращения (длительности суток), что не подтверждается геологическими фактами и астрономическими наблюдениями. Полученные нами величины полностью согласуются с выводами П.Н. Кропоткина, допускающего изменения радиуса Земли на 4-5 см за 100 лет (Кропоткин, 1970).

Кроме того, фактически зарегистрированные на основе астрономических данных изменения длительности суток свидетельствуют о правомерности приведенных нами масштабов возможных изменений радиуса Земли (Киселев, 1980).

Предлагаемый нами механизм влияния сверхдлинных астро-гравитационных волн на перераспределение геодинамической энергии в недрах Земли мог бы вполне удовлетворительно объяснить наблюдаемые в реальности квадрупольные вариации радиуса Земли, зафиксированные НАСА с помощью искусственных спутников Земли (Cox, Chao, 2002).

Глава 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ИЗМЕРЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ

5.1. ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ

Как было отмечено в предыдущих разделах, исследованиям вариаций измеренных значений гравитационной постоянной было посвящено много работ, среди которых особо хотелось бы выделить исследования В.П. Измайлова, О.В. Карагиоза и А.Г. Пархомова (1999). На наш взгляд, особая ценность этих исследований заключается в их целенаправленности на мониторинг G в течение достаточно длительного периода времени. Другим важным фактором является высокая корректность проводимых измерений гравитационной постоянной, обусловленная не только серьезно продуманной методологической и инструментальной базой эксперимента, но и тем, что замеры проводились на протяжении всего периода мониторинга одним и тем же прибором, без изменения его местоположения и ориентации. Последнее замечание может показаться странным, так как на гравитационную постоянную и даже на вариации ее измеренных значений, по логике, ориентация весов Кавендиша не должна оказывать никакого влияния. Между тем приведенные ниже результаты не совсем обычного эксперимента показывают обратное.

Учитывая наличие в космическом пространстве множества различных факторов, возмущающих кривизну пространственно-временного континуума, таких, как гравитационные волны, движение планет, звезд, галактик по своим орбитам, мощных гравитационных неоднородностей, порождаемых черными дырами, можно предположить влияние этих возмущений на гравитационное взаимодействие больших и малых масс в весах Кавендиша.

Для регистрации возможных влияний внешних факторов на изменения метрики кривизны пространства, в Научно-исследовательском институте прогнозирования и изучения землетрясений (НИИ ПриИЗ г.Баку) был изобретен, разработан, изготовлен и введен в действие детектор длиннопериодных гравитационных

вариаций, позволяющий измерять вариации гравитационного поля в трех взаимно перпендикулярных направлениях - X, Y, Z (Халилов, 2004).

5.2. ТОРСИОННЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВАРИАЦИЙ (ТД ДГВ)

Физический принцип данного детектора, условно названного «Торсионный детектор длиннопериодных гравитационных вариаций (ТД ДГВ)» был запатентован, на него была также оформлена международная заявка РСТ (Khalilov E.N. Method for recording low-frequency gravity waves and device for the measurement thereof. WO 2005/003818 A1. 13.01.2005).

Прибор представляет собой замкнутую и изолированную от внешней среды систему сенсоров, использующих физический принцип «Весов Кавендиша», в которых подвешены на нитях вместо одного - два коромысла с малыми массами на концах, причем эти коромысла расположены взаимно перпендикулярно. Между малыми массами, размещенными на концах двух коромысел, на равном удалении от них размещены большие массы (рис. 133).

Кроме того, имеется и третий измерительный датчик - пробная масса, подвешенная на специальном подпружиненном рычажке и имеющая возможность вер-

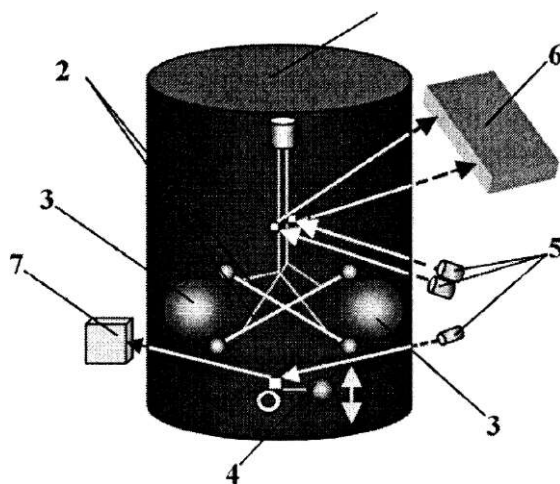


Рис. 133. Схема конструкции ТД ДГВ

1 - стеклянный корпус детектора; 2 - коромысла с малыми массами на концах; 3 - большие массы; 4 - пробная масса подвешенная на подпружиненном рычажке; 5 - лазерные излучатели; 6 - чувствительная оптическая матрица для горизонтальных сенсоров; 7 - чувствительная оптическая матрица для вертикального сенсора

тикальных смещений при изменении относительных значений ускорения силы тяжести Ag Земли. Вариации Ag обусловлены появлением локальных гравитационных аномалий, которые могут быть вызваны изменением плотности толщи горных пород под прибором в результате изменения их напряженного состояния и, как следствие, плотности, а следовательно и их массы.

На рис.133 схематически показано устройство ТД ДГВ.

Как видно из схемы, на коромыслах с массами и на рычажке вертикального датчика имеются миниатюрные зеркальца, на которые направлены три лазерных луча. Отразившись от зеркалец, лучи попадают на чувствительные оптические матрицы, где происходит преобразование оптического сигнала от лазерной метки в электрические сигналы и их передача в аналогово-цифровой преобразователь с последующей передачей цифрового сигнала в специальный блок компьютера, с записью в специальном формате. Разработанное в НИИ ПриИЗ программное обеспечение позволяет автоматически записывать информацию в виде отдельных файлов за определенный период времени, устанавливаемый оператором. Например, каждые сутки может быть записан один файл, после чего файл автоматически записывается без прерывания записи. В процессе записи могут производиться обработка и анализ записи в реальном масштабе времени. Вся чувствительная система помещена в специальный, изолированный от внешней среды, стеклянный корпус, в котором создан и постоянно поддерживается глубокий вакуум. Вакуум поддерживается с помощью двух вакуумных насосов - насоса создания первичного вакуума и насоса для создания глубокого вакуума. После создания глубокого вакуума величиной $Ю^{-4}$, насос для глубокого вакуума переходит в режим постоянного поддержания установленной величины вакуума.

В разных областях чувствительной системы установлены датчики температуры с точностью до $0,1C^{\circ}$, которые выведены на блок контроля температуры системы. Блок контроля температуры осуществляет температурную стабилизацию системы с точностью до $1C^{\circ}$.

Вакуумный корпус с чувствительной системой, для исключения механических воздействий и лучшей теплоизоляции, помещен в прозрачный пластмассовый корпус, позволяющий визуально наблюдать за работой системы. Параллельно с указанными сенсорами, в детекторе также предусмотрена цифровая сейсмическая станция с использованием трехкомпонентного сейсмоприемника типа СМЗ, информация от которого также передается на компьютер и непрерывно записывается по трем каналам X, Y, Z. Запись сейсмограммы по трем каналам также производится непрерывно в цифровом виде и позволяет производить ее обработку и анализ в реальном масштабе времени.

Регистрация сейсмических колебаний необходима, чтобы исключить возможное влияние этих колебаний на дестабилизацию чувствительной системы детектора и появление ложных аномалий, вызванных сейсмическими процессами.

Необходимо отметить, что применение компьютерных технологий позволило полностью изолировать детектор в отдельном помещении и работать с ним по

локальной сети без входа операторов в помещение. Дистанционное управление детектором и съем информации минимизирует внешние воздействия на чувствительную систему. Система имеет также доступ посредством сети ИНТЕРНЕТ.

Все элементы чувствительной системы выполнены из неметаллических материалов, что исключает воздействие на эти элементы магнитного поля и электромагнитных излучений. В то же время поддержание в корпусе чувствительной системы глубокого вакуума исключает воздействие на систему конвективных потоков воздуха, которые могли бы возникнуть в результате температурных неоднородностей разных частей системы. Полный комплект детектора ТД ДГВ составляет станцию прогнозирования землетрясений АТРОПАТЕНА, размещенную в здании НИИ ПриИЗ в г. Баку (рис. 134, 135). Станция была частично введена в действие в сентябре 2005 г., при этом непрерывная запись велась только по одному вертикальному каналу Z. С апреля 2007 г. станция была полностью введена в действие, что позволило получить высококачественную информацию о вариациях гравитационного поля во времени по трем осям - X, Y, Z, а также записанную параллельно сейсмологическую информацию с помощью широкополосной цифровой сейсмической станции Tethys-SD, также разработанной и изготовленной в НИИ ПриИЗ.

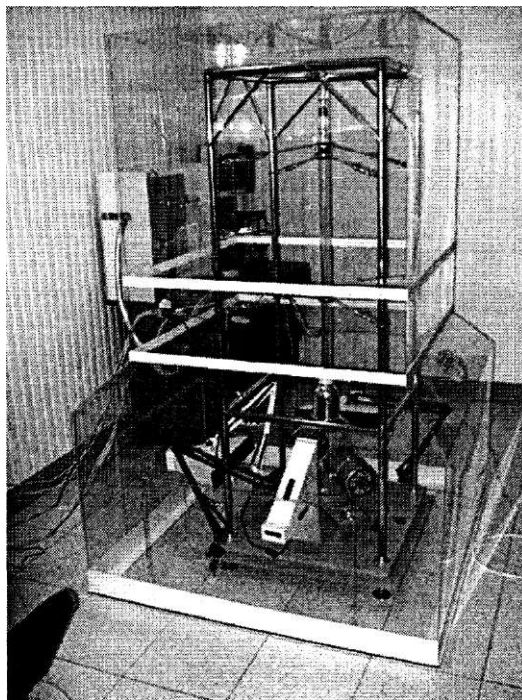


Рис. 134. Фотография Торсионного Детектора Длиннопериодных Гравитационных Вариаций (ТД ДГВ), расположенного на станции прогнозирования землетрясений НИИ прогнозирования и изучения землетрясений (г. Баку)

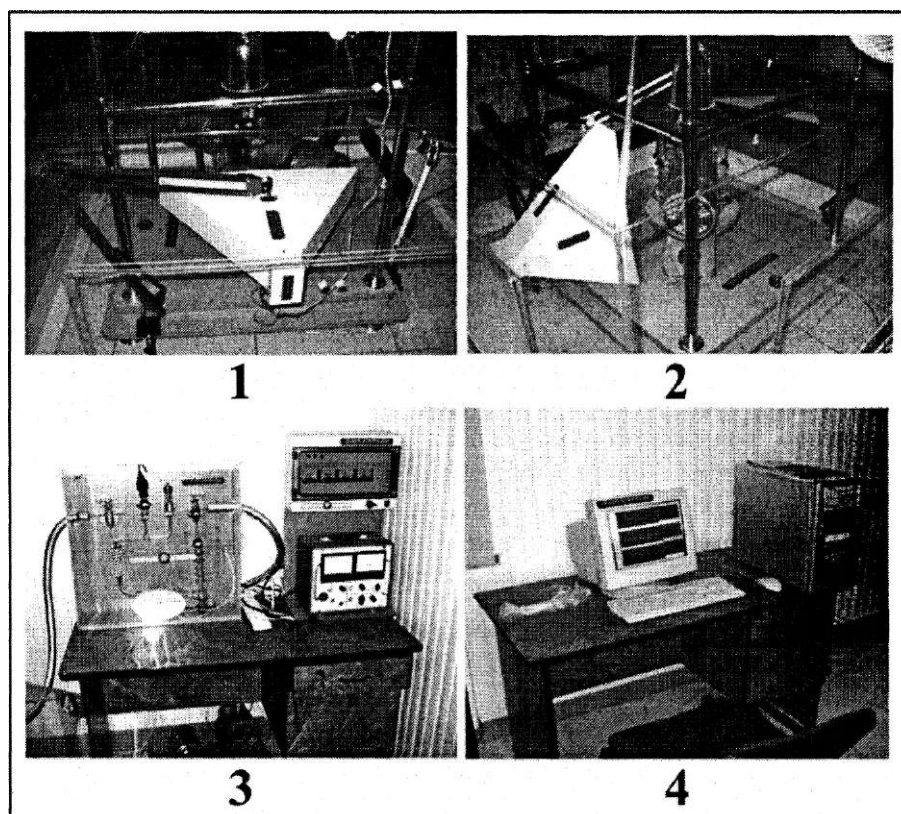


Рис. 135. Отдельные элементы ТД ДГВ

1 - один из двух лазерных сенсоров горизонтальных перемещений коромысла с малыми массами; 2 - лазерный сенсор вертикальных смещений пробной массы; 3 - блок создания и автоматизированного содержания глубокого вакуума в стеклянном корпусе чувствительной системы детектора и контроля температуры; 4 - многоканальная регистрирующая система с выводом информации на монитор и возможностью обработки данных в режиме записи в реальном масштабе времени

5.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТОРСИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ «АТРОПАТЕНА» ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВАРИАЦИЙ И ИХ ВОЗМОЖНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

С сентября 2006 г по 01 апреля 2007 г. торсионный детектор ДГВ работал в режиме записи только одного канала - Z. С 01 апреля 2007 года станция АТРОПАТЕНА была полностью введена в действие, при этом непрерывная запись производилась по всем трем каналам - X, Y, Z.

Ниже приводятся результаты интерпретации непрерывной записи ТД ДГВ в течение 9 месяцев, с 01 апреля по 31 декабря 2007 г.

На рис. 136 показаны графики вариаций гравитационного поля, зарегистрированных тремя непрерывно записывающими сенсорами, два из которых (X, Y) - фактически регистрируют значение гравитационной постоянной G в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а третий (Z) - регистрирует вариации во времени ускорения силы тяжести Ag , причем экспериментальным путем удалось установить цену деления сенсора Z в миллигалах (мГал). По аналогии с сейсмограммой, назовем непрерывную запись гравитационного поля в трех взаимно перпендикулярных направлениях гравитограммой. С точки зрения современных представлений фундаментальной физики, безусловно, регистрация гравитационной постоянной с помощью весов Кавендиша, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях, бессмысленна, ибо, как известно из классической физики, G является константой и не зависит от ориентации взаимодействующих масс. Но это в идеальном случае, когда пространство находится в однородном гравитационном поле. Между тем, если учесть, что в реальной среде гравитаци-

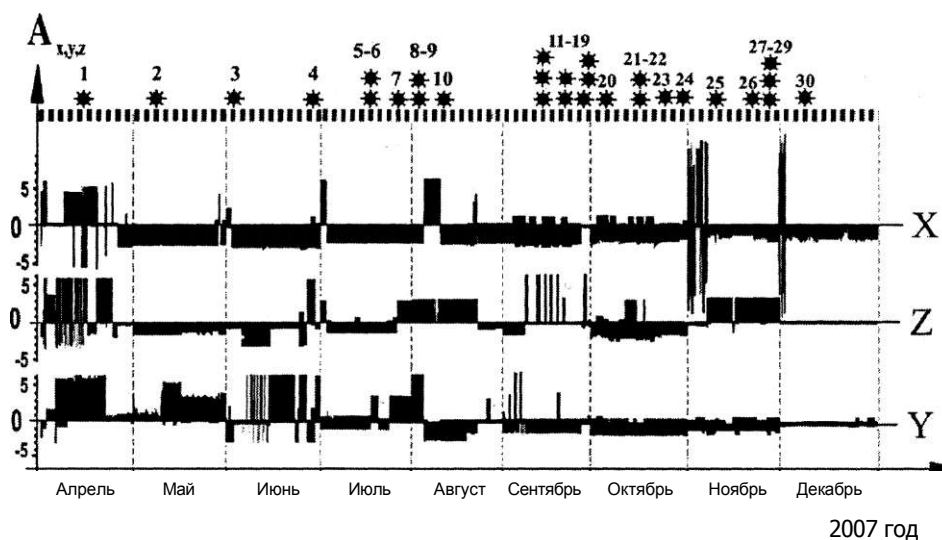


Рис. 136. График (гравитограмма) зарегистрированных вариаций гравитационного поля по осям X, Y, Z с помощью торсионного детектора ATROPATENA

A_x - безразмерный индекс, характеризующий амплитуду отклонения коромысел с малыми грузами по осям X и Y, а также вертикальные отклонения пробной массы, отражающее вариации ускорения силы тяжести по оси Z; T - ось времени

Звездочками обозначены сильные землетрясения: цифра сверху обозначает порядковый номер землетрясения по каталогу (табл. 25)

онное поле является неоднородным и подвержено пространственно-временным возмущениям различного характера, начиная от влияния гравитационных волн космического происхождения, приливных сил Солнца и планет Солнечной системы и кончая геофизическими и тектоническими процессами в глубинных недрах Земли, то измерение G при различной ориентации весов Кавендиша может дать интересные и весьма неожиданные результаты.

Даже поверхностный взгляд на представленный график позволяет заметить ярко выраженные закономерности в записях всех трех сенсоров. Необходимо отметить, что результаты анализа гравитограмм позволили нам прийти к выводу, что детектор ATROPATENA зарегистрировал гравитационные возмущения, имеющие корреляционную связь с крупными сейсмическими событиями, произошедшими за рассматриваемый промежуток времени в пределах восточного полушария. По всей видимости, это связано с географическим расположением станции ATROPATENA. В табл. 25 приведены данные о сильных землетрясениях, произошедших в Восточном полушарии Земли с 01 апреля по 31 декабря 2007 г.

Таблица 25

**Каталог сильных землетрясений Восточного полушария Земли
с 1 апреля по 31 декабря 2007 г.**

Дата	Время часы, минуты, сек	Географические координаты		Глубина	Магнитуда	Наименование местности
		Широта	Долгота			
15.04	03 19 30.3	34.807N	136.239E	16D	5.1	Western Honshu, Japan
06.05	21 11 52.5	19.401 S	179.354W	676D	6.5	Fiji region
02.06	21 34 57.7	23.028N	101.052E	5G	6.1	Yunnan, China
28.06	02 52 09.6	7.969 S	154.630E	10G	6.7	Bougainville region, Papua New Guinea
16.07	0113 22.3	37.535N	138.446 E	12G	6.6	Near the west coast of Honshu, Japan
16.07	14 17 37.3	36.808 N	134.850E	350D	6.8	Sea of Japan
26.07	05 40 16.1	2.872 N	127.464E	25 G	6.9	Molucca sea
01.08	17 08 51.4	15.595 S	167.680E	120G	7.2	Vanuatu
02.08	02 37 42.3	47.116 N	141.798 E	5G	6.2	Tatar strait, Russia
08.08	17 05 04.9	5.859S	107.419E	280G	7.5	Java, Indonesia
12.09	11 10 26.8	4.438S	101.367E	34G	8.4	Southern Sumatra, Indonesia
12.09	23 49 03.7	2.625 S	100.841E	35 G	7.9	Kepulauan Mentawai region, Indonesia
13.09	03 35 28.7	2.130 S	99.627 E	22 G	7.0	Kepulauan Mentawai region, Indonesia

таблица 25 (окончание)

20.09	08 31 14.4	1.999S	100.141E	30G	6.7	Southern Sumatra, Indonesia
26.09	12 36 26.8	4.990 S	153.500E	40G	6.7	New Ireland region, Papua New Guinea
28.09	13 38 59.5	22.004N	142.651E	276	7.4	Volcano Islands, Japan region
30.09	02 08 30.1	10.454 N	145.718E	14G	6.9	South of Mariana Island
30.09	05 23 34.0	49.271S	164.115E	10G	7.4	Auckland Islands, New Zealand region
30.09	09 47 51.9	49.138S	164.110E	18G	6.6	Auckland Islands, New Zealand region
05.10	07 17 52.8	25.189S	179.459E	509	6.5	South of the Fiji Islands
15.10	12 29 36.0	44.785S	167.583E	26D	6.8	South Island of New Zealand
16.10	21 05 43.2	25.775S	179.530 E	509 D	6.6	South of the Fiji Islands
24.10	21 02 50.4	3.896S	101.017E	20G	6.8	Southern Sumatra, Indonesia
31.10	03 30 17.6	18.896N	145.363E	223D	7.2	Pagan Region, Northern Mariana Islands
10.11	01 13 29.3	51.777S	161.318E	10G	7.3	Nort of Macquarte Island
22.11	08 48 27.5	5.762S	147.122E	53 G	6.7	Eastern New Guinea Reg, Papua new Guinea
25.11	16 02 20.0	8.258S	118.343E	53	6.5	Sumbawa Region, Indonesia
25.11	19 53 08.8	8.181S	118.494E	35 G	6.5	Sumbawa Region, Indonesia
27.11	11 49 58.1	10.990 S	162.225E	16G	6.6	Solomon Islands
09.12	07 28 19.6	26.057S	177.518W	143	7.8	South of the Fiji Islands

Необходимо отметить, что вариации измеренных значений гравитационной постоянной G по осям X и Y отражаются в третьем знаке после запятой. При этом надо принять во внимание, что сближение малых масс в весах Кавендиша с большими массами по осям X и Y соответствует положительным значениям на гравитограмме, а удаление - отрицательным.

На гравитограмме отчетливо наблюдается, что всем сильным землетрясениям восточного полушария предшествуют зарегистрированные вариации гравитаци-

онного поля, причем, что самое интересное, сенсоры регистрируют эти вариации не одновременно, а с определенным смещением во времени. Так, ярко выраженные гравитационные аномалии имеют явно выраженные смещения во времени в апреле, июне-июле, июле-августе, сентябре, октябре-ноябре, ноябре-декабре. Примечательно, что сначала всплеск вариации гравитационного поля регистрируется сенсором Y , затем Z и в завершение сенсором X . Время запаздывания гравитационных возмущений от сенсора Y к сенсору Z , также, как и от Z к X , в среднем составляет 5-8 дней. Примечательно, что от апреля к концу 2007 г. наблюдается повышение сейсмической активности, с несколькими ярко выраженными циклами: первый с середины июля до середины августа, второй с 11 сентября до 05 октября, третий с 20 по 31 октября и четвертый с 10 по 29 ноября.

Проведем более детальный анализ записей детектора ATROPATENA, начиная с апреля 2007 г. Как видно из гравитограммы (рис. 137), 15 апреля 2007 г. в районе Западного Хоншу Японии произошло землетрясение с магнитудой 5,1. С 01 апреля вертикальный сенсор Z начал регистрировать вариации ускорения силы тяжести как в отрицательную, так и в положительную стороны, примерно на величину $\pm 0,2-0,3$ мГал. Со 2 апреля процесс принял более однозначный характер, при этом значение силы тяжести несколько снизилось до 0,2 мГал и держалось на этом уровне до 04 сентября. С 6 апреля значение силы тяжести увеличилось до 0,3 мГал и держалось на этом уровне вплоть до 15 апреля. 6 мая в районе Фуджи происходит сильное землетрясение с магнитудой 6,5.

С 5 апреля сенсор Y начал активизироваться и в течение 15 часов записывал попеременные отклонения как в положительную, так и в отрицательную сторону. С 06 апреля значение сенсора Y сместилось в положительную сторону на 5 условных единиц и держалось на этом уровне вплоть до 16 апреля.

С 8 апреля, с запозданием на 3 дня по отношению к сенсору Y , начал активизироваться сенсор X , сместившись в положительную сторону на 5 единиц. Судя по характеру записи, можно сделать предположение, что имеется определенное

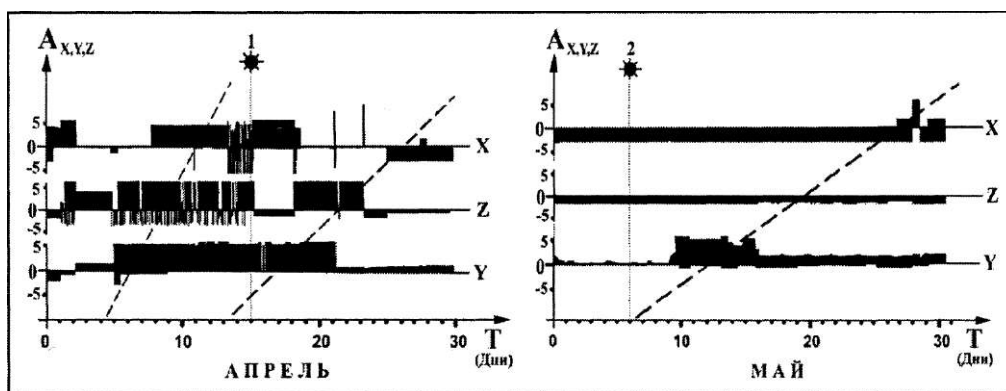


Рис. 137. Гравитограммы за апрель и май 2007 г.

смещение во времени в записях сенсоров: 5 апреля повышаются значения сенсора Y на 5 единиц, через сутки - 6 апреля повышается значение сенсора Z и через трое суток, 8 апреля, повышается значение сенсора Z .

Примечательно, что за двое суток до толчка резко увеличивается активность сенсора X , который начинает колебаться с достаточно высокой частотой 9-14 минут как в положительную (на 5 единиц), так и в отрицательную (на 6 единиц) стороны. Как видно из гравитограммы, после Японского землетрясения №1, 15 апреля, примерно через сутки сенсор Y возвращается к фоновому значению и держится на этом уровне в течение 3 часов, сенсор Z также возвращается к фоновому значению, сохраняясь на этом уровне вплоть до 18 апреля, а сенсор X стабилизируется на уровне положительного значения 5 единиц также до 18 апреля.

Как видно из короткого анализа гравитограммы, зафиксировано некоторое запаздывание в проявлениях гравитационных возмущений от сенсора Y к сенсору Z на одни сутки и от Z к X на трое суток. Запись, отражающую процесс разрядки напряжений в литосфере, условно можно разделить на три составляющие - за десять дней до толчка, за двое суток до толчка, и после толчка, в течение трех суток.

С 16 апреля начинается очередная активизация сенсора Y с повышением значения на 5 единиц, 18 апреля активизируется сенсор Z с повышением значения также на 5 единиц, и 25 апреля активизируется сенсор X , сместившись в отрицательную сторону на 3 единицы. Таким образом, с момента начала регистрации гравитационных возмущений 16 апреля до начала толчка проходит 20 дней, при этом запаздывание активизации Сенсора Z по отношению к сенсору Y составляет трое суток, а сенсора X по отношению к Z - 7 суток. С момента активизации сенсора X (25 апреля) до начала землетрясения проходит 11 суток. 21 апреля сенсор Y стабилизируется и возвращается к фоновому значению, 23 апреля стабилизируется сенсор Z , и 30 апреля возвращается к фоновому значению сенсор X . Таким образом, за 6 суток до землетрясения все три сенсора стабилизируются, возвратившись к фоновым значениям. Только к 9 мая начал активизироваться сенсор Y , увеличив значение на 5 единиц. Эта положительная аномалия с небольшими колебаниями продолжается до 16 мая, после чего сенсор принимает фоновое значение. Сенсор X в течение мая не проявляет активности, превышающей фоновое значение, тогда как сенсор X начиная с 27 мая регистрирует положительную аномалию амплитудой 3 единицы, которая увеличивается до 5 единиц 28 мая и затем резко падает 29 мая до -3 единиц. С 29 до 31 мая сенсор X колебался от +2 до -3 единиц, возвратившись к фоновому значению ко 2 июня.

2 июня в районе Юннань в Китае произошло ощутимое землетрясение №3 с магнитудой 6,1 (рис. 138). Как видно из гравитограммы, после этого землетрясения все три сенсора стабилизируются, возвращаясь к фоновому значению и сохраняя его вплоть до 7 июня. 7 июня наблюдается определенная активность сенсора Y , имеющего периодические нестабильные колебания в положительную сторону на 5 единиц. Начиная с 15 июня, сенсор Y регистрирует устойчивую по-

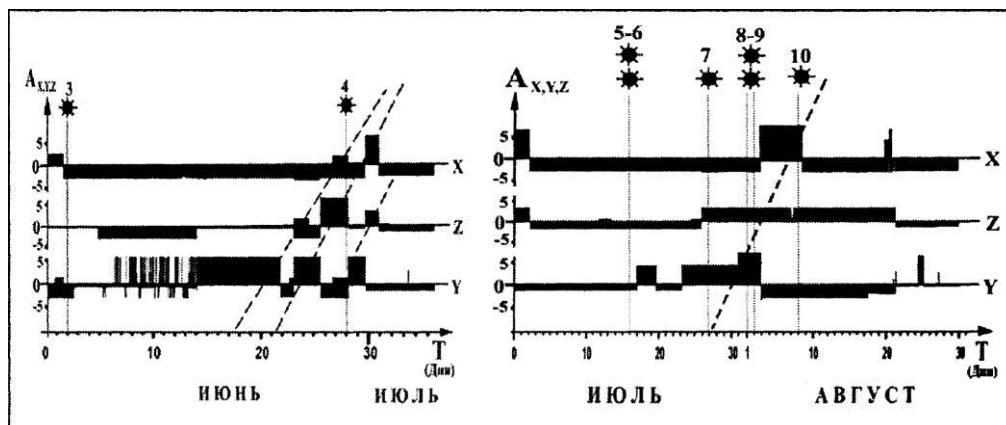


Рис. 138. Гравитограммы за июнь-август 2007 г.

ложительную аномалию с амплитудой 5 единиц вплоть до 21 июня, после чего, с 21 на 22 июня, положительная аномалия сменяется на отрицательную с амплитудой -3 единицы, которая длится до 23 июня. 23 июня опять наблюдается смена знака аномалии, регистрируемой сенсором Y, до 5 единиц. Одновременно начинает активизироваться сенсор Z, колеблясь в положительную и отрицательную область с амплитудами (+2) и (-3).

С 25 на 26 июня происходит опять смена знаков, при этом сенсор Y регистрирует отрицательную аномалию с амплитудой 3 единицы, а сенсор X - положительную аномалию с амплитудой 6 единиц, причем в этом режиме сенсоры работают вплоть до 28 июня. В то же время 27 июня начинается незначительная активизация сенсора X с амплитудой в 2 единицы. Таким образом, мы наблюдаем последовательную, со смещением во времени на 5-6 суток, активизацию сенсоров Y, Z, а затем X.

С 23 июня сенсор Y начинает регистрировать очередную положительную аномалию с амплитудой 5 единиц, 26 июня сенсор Z также начинает регистрировать аналогичную аномалию, и, наконец, 29 июня начинает регистрировать положительную аномалию с амплитудой в 6 единиц сенсор X. Опять мы наблюдаем последовательное смещение во времени на трое суток в записях положительных аномалий сенсоров Y, Z и X. С 28 июня наблюдается очередная активизация сенсоров Y и Z, со смещением во времени на двое суток. 16 июля в Японии происходят два сильных землетрясения (№5 и №6 по табл. 25) с магнитудами 6,6 и 6,8. Таким образом, этим землетрясениям предшествовала запись трех групп положительных и отрицательных аномалий, при этом во всех случаях аномалии, зарегистрированные сенсорами Y, Z и X имели, соответственно, последовательные смещения во времени относительно друг друга с периодом, в среднем, 3-5 суток и общим периодом запаздывания от начала записи аномалий сенсором Y до начала записи аномалий сенсором X около 8-9 суток.

С 17 июля наблюдается запись первой в июле положительной аномалии сенсором Y , а с 23 июля регистрируется вторая положительная интенсивная аномалия. С 26 июля активизируется сенсор Z , и со 2 августа сенсор X . В этот период происходит серия сильных землетрясений (№7-№10 по табл. 25) с магнитудой 6,8-7,5. Как видно из гравитограммы, этим землетрясениям также предшествуют записи аномалий, причем в очередной раз фиксируется смещение во времени этих аномалий на записях сенсоров Y , Z и X , с периодом запаздывания 3-6 суток. Таким образом, общий период запаздывания аномалий, записанной сенсором X , относительно аномалий, записанной сенсором Y , составляет около 9 суток.

Гравитограмма за сентябрь 2007 г. (рис. 139) отличается наличием серии относительно коротких аномальных положительных импульсов на всех трех сенсорах с периодами 6-12 часов, предшествующих сильнейшим землетрясениям в Индонезии (№11-№13), произошедших 12 сентября ($M_{8,4}$; $M_{7,9}$) и 13 сентября ($M_{7,0}$). Примечательно, что землетрясениям предшествовали интенсивные импульсы, записанные сенсорами Y и Z с амплитудой 6-7 ед., при этом сенсором X были записаны аномалии более длительные, но с меньшими амплитудами - 2 ед. Общее время запаздывания начала записей аномалий сенсором Y относительно сенсора X составляет около 5-6 суток.

2, 4 и 6 сентября сенсор Y записывает ярко выраженные высокоамплитудные положительные импульсы (амплитуда 7-8 ед.). С 12 до 27 сентября активизируется сенсор Z и записывает шесть относительно коротких (с периодом 5-10 часов), но высоко амплитудных (7-8 ед.) гравитационных импульсов.

Как видно на гравитограмме, в очередной раз фиксируется запаздывание по времени между аномалиями, записанными сенсорами Y , Z и X , с общим периодом запаздывания около 5 суток.

20 сентября произошло очередное сильное землетрясение в Индонезии (о. Суматра) с $M_{6,7}$. Как видим, этому землетрясению также предшествовала запись

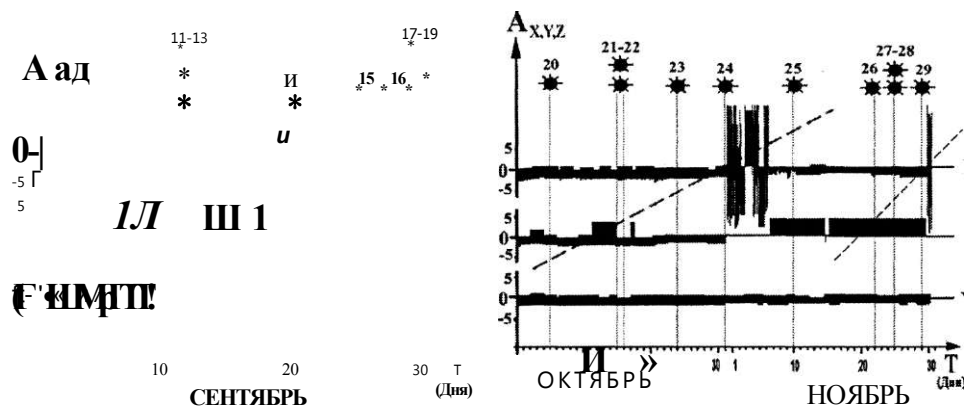


Рис. 139. Гравитограммы за сентябрь-ноябрь 2007 г.

ряда интенсивных гравитационных импульсов, записанных всеми тремя сенсорами. Между тем, на наш взгляд, серия из шести интенсивных гравитационных импульсов записанных сенсором Z отражала подготовку целой серии сильных землетрясений (№14-№19).

5 октября произошло сильное землетрясение (№20) в районе о-вов Фуджи с Мб,5 и, по нашему мнению, ему предшествовало два интенсивных гравитационных импульса, зарегистрированных сенсорами Y и Z 27 сентября.

15 и 16 октября в районах Новой Зеландии и о-вов Фуджи опять произошло два землетрясения с Мб,8 и Мб,6, которым предшествовала запись гравитационной аномалии сенсором Z с 11 по 15 октября. Землетрясения №23 и №24 в районах Индонезии и Марианских о-вов, по всей видимости, отражаются коротким гравитационным импульсом с амплитудой 5 ед., зарегистрированным 17-18 октября.

С 31 октября по 7 ноября сенсором X регистрируются необычно интенсивные аномалии, отличительной особенностью которых является не только их чрезвычайно высокая амплитуда (12-15 ед.), но и колебания с данной амплитудой как в положительную, так и в отрицательную сторону, причем периоды этих импульсов колеблются от 1 часа до 5-10 часов. Через 3 дня после стабилизации сенсора X, 10 ноября, происходит сильное землетрясение №25 с М7,3. Между тем, это только начало интенсивных сейсмических событий. С 22 по 27 ноября происходит четыре сильных землетрясения (№26-№29) с магнитудами 6,5-6,7. Таким образом, гравитационная аномалия сверхвысокой интенсивности и необычного характера, записанная сенсором X с 31 октября по 07 ноября 2007 г., являлась, на наш взгляд, предвестником пяти сильных землетрясений, произошедших с 10 по 27 ноября в районе юго-восточной Азии. Примечательно, что, несмотря на запись столь интенсивной аномалии сенсором X, сенсоры Y и Z не регистрировали заметной активности в вариациях гравитационного поля. Не исключено, что это связано с высокой избирательной способностью сенсоров по отношению к направлению источника гравитационных аномалий.

30 ноября наблюдается очередная активизация сенсора X, причем сенсором опять записаны очень интенсивные аномальные импульсы гравитационного поля, с амплитудой 15-17 ед. как в положительную, так и в отрицательную области.

Эта интенсивная аномалия продолжает проявляться и в начале декабря (рис. 140) и регистрируется вплоть до конца дня 2 декабря, после чего сенсор X стабилизируется и сохраняет фоновое значение вплоть до конца декабря. 9 декабря происходит очень сильное землетрясение №30 в районе о-вов Фуджи с М7,8. Таким образом, при определении предвестника этого землетрясения трудно ошибиться. На гравитограмме явно видно, что этому землетрясению предшествует запись сенсора X интенсивной гравитационной аномалии с 30 ноября по 2 декабря. В данном случае также не отмечено активности других сенсоров. Надо отметить, что направление на регион землетрясения то же, что и при предыдущих пяти толчках.

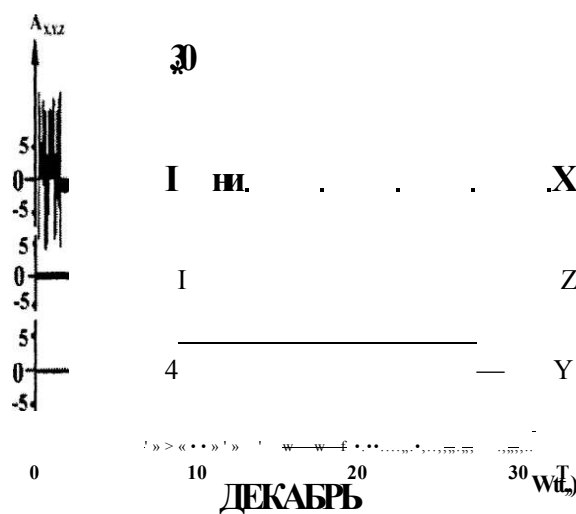


Рис. 140. Гравитограмма за декабрь 2007 г.

Завершая данный короткий анализ гравитограмм с апреля по конец декабря 2007 г., мы хотели бы сконцентрировать внимание читателя на том, что нами продемонстрирована только общая, достаточно поверхностная интерпретация записей гравитограмм. Для разработки серьезных основ методики прогнозирования землетрясений на основе гравитограмм требуется их более скурпулезное изучение. Гравитограммы содержат огромную информацию для размышления и изучения, и, на наш взгляд, их детальное изучение позволит пролить свет на многие вопросы геологии и геофизики, остающиеся пока без ответов.

Для примера приводим более развернутую запись гравитограммы за 5 апреля (рис. 141). С 17-00 до 19-00 часов наблюдается активная запись гравитационных аномалий, имеющих амплитуду -3 (сенсор X) и +4 (сенсор Y), при этом сенсор Z проявляет незначительную активность. Между тем, с 19-00 по 22-00 сенсор Z записывает гравитационную аномалию, резко отличающуюся по форме от записанных до этого сигналов сенсорами Y и X. При этом сенсоры Y и Z не проявляют никакой активности до конца записи. Между тем сенсор Z продолжает записывать импульсные сигналы до конца записи. Сразу хотим исключить возникающее при рассмотрении записей впечатление, что сенсоры Y и X записали микросейсмы или колебания от далеких землетрясений. Дело в том, что период единичного колебания в приведенной пачке импульсов составляет 4-12 минут. Возможно, эти записи отражают модуляции сейсмического шума, но тогда эти модуляции могут нести в себе важную информацию о масштабных геодинамических процессах.

Вторая гравитограмма за 16-17 апреля (рис. 142) приведена для того, чтобы показать, что записанные необычные гравитационные аномалии за 05 апреля не

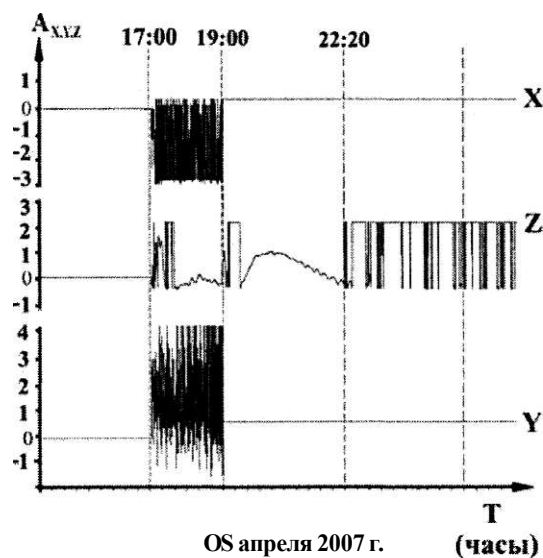


Рис. 141. Гравитограмма за 05 апреля 2007 г.

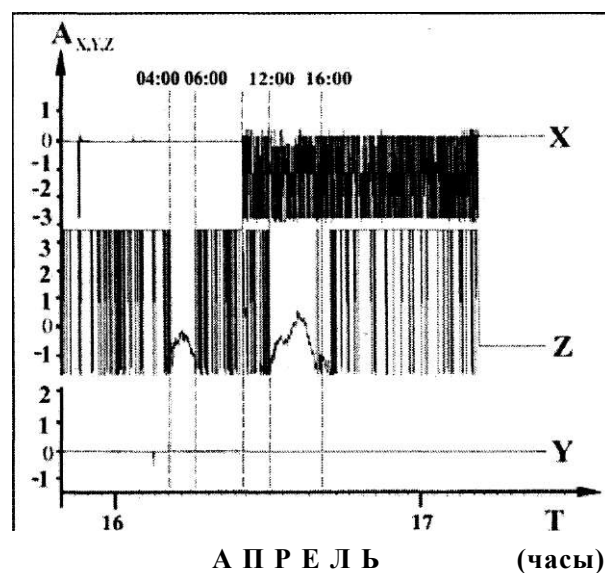


Рис. 142. Гравитограмма за 16-17 апреля 2007 г.

являются случайными, а периодически повторяются в различные промежутки времени. В частности, достаточно интересно, что пачки импульсов, записанные сенсором Z, дважды прерываются ясно выраженными низкочастотными аномалиями, первая из которых записана 16 апреля с 04:00 до 06:00 и имеет период 2 часа, а вторая - с 12:00 до 16:00 и имеет период 4 часа.

Во всяком случае, более детальное изучение гравитограмм, на наш взгляд, предоставит исследователям обильную пищу для дальнейших размышлений и возможных открытий.

5.4. ОТРАЖЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ВОЛН В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЯХ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Результаты детального анализа записей торсионного детектора ДГВ наводят на мысль о том, что столь необычное пространственно-временное распределение вариаций гравитационного поля отражает прохождение под регистрирующей станцией так называемых тектонических волн, называемых порой деформационными, литосферными или волнами напряжений. По сути, все вышеперечисленные термины отражают один и тот же физический процесс, имеющий характер волнообразной передачи механических напряжений, исходящих от крупномасштабного источника этих излучений. Возможно, что разница в восприятии этих волн лишь в их периоде. Но, в любом случае, эти волны отличаются от сейсмических волн чрезвычайно большими периодами, от десятков минут до десятилетий, и огромными длинами волн, от тысяч до десятков тысяч километров.

Основы концепции тектонических волн были заложены в математической модели В. Эльзассера, в соответствии с которой перераспределение сжимающих усилий, осредненных по поперечному сечению упругой литосферы, компенсируется касательными усилиями, возникающими в силу горизонтального смещения литосферы по вязкой астеносфере (Elsasser, 1969). Впоследствии эта модель была использована для количественной оценки передачи афтершоковой активности (Kasahara, 1985; Баранов, Лобковский, 1980).

Впоследствии модель Эльзассера была дополнена Дж. Райсом (Rice, 1982) эффектом вязкоупругой реакции астеносферы на горизонтальные смещения литосферы. Он также учел реальную двумерность процесса. Теоретический анализ распространения волн сейсмической активности в литосфере был дан в работах Ф. Лехнера и других исследователей (Lehner et al., 1981). Эффект изгиба литосферы на жидком литосферном основании нашел отражение в работах А. Надаи и Е.В. Артюшкова (Nadai, 1969; Артюшков, 1979). Впоследствии в работах Н.В. Николаевского, А.В. Каракина и Л.И. Лобковского (1984) была принята попытка разработки двумерной теории волн изгиба-сжатия литосферы на вязкой астеносфере.

В.Н. Николаевский и Т.К. Рамазанов (1985) объединили подходы предыдущих исследований и предложили двумерное уравнение тектонических волн изгиба-сжатия, с учетом вязкоупругости астеносферы.

Некоторые исследователи рассматривают крупные тектонические разломы в качестве своеобразных волноводов, в пределах которых происходит распространение тектонических волн на значительные расстояния (Rice, 1980; Kasahara, 1985). Ряд исследователей предлагают также учитывать при построении модели тектонических волновых процессов фазовые переходы и теплопередачу, частичное плавление астеносферы и связанную с этим ее двухфазность, гравитационную неустойчивость и т.д. (Каракин, Лобковский, 1984; Гарагаш, 1984; Дубровский, 1985).

Расчеты, проведенные с одновременным учетом продольного сжатия и изгиба литосферы в процессе распространения тектонической волны, позволили В.Н. Николаевскому получить весьма интересные результаты. Так, было установлено, что для тектонической волны, движущейся вдоль тектонического разлома скорость может составлять около 10 км/год, тогда как в случае движения волны поперек разлома тектоническая волна будет интенсивно затухать (Николаевский, Рамазанов, 1986).

В результате исследований, проводимых кафедрой Физики Земли Петербургского Государственного Университета (Т.Б. Яновская, Л.Н. Петрова, В.В. Карпинский, Ю.Г. Фарафонова, Е.Л. Лыскова, К.Ю. Санников), получены данные, существенно совпадающие с выводами авторов настоящей монографии. Прежде всего необходимо отметить, что выявлена высокая степень согласия максимальных составляющих в синхронных спектрах наблюдений на станциях, расположенных в Евразии (SSB, Франция; WUS, Китай; SEM, Россия; NYB, Индия; INU, Япония), со статистическим спектром сейсмогравитационных колебаний, установленным ранее по наблюдениям в Петербурге, что свидетельствует о планетарных масштабах наблюдаемых процессов. По мнению петербургских ученых, ими зарегистрированы сейсмогравитационные колебания литосферы, при этом сделаны первые оценки скорости и длины волн. Низкоскоростные волны (скорости от 0,35 до 0,68 км/с) сейсмической природы имели длины от 1520 до 7 310 км. В результате анализа полученных результатов ученые пришли к выводу о том, что наблюдаемые колебания связаны с деформационными процессами, протекающими внутри континента со сложной блочно-иерархической структурой. Сейсмогравиметрическим комплексом в Петербурге зарегистрирована долговременная деформация растяжения (по вертикали) продолжительностью 12 суток, которая предвещала цикл сильных землетрясений декабря 2004 года, включая сильнейшее землетрясение на севере о-ва Суматра 26.01.2004, вызвавшее катастрофическое цунами. Перед каждым сильным землетрясением зарегистрированы деформации меньшей продолжительности (1-2 суток), наблюдавшиеся и ранее. Отмечено также возрастание интенсивности сейсмогравитационных колебаний, сопутствующее этим деформациям, начало которого всегда опережало момент разрыва сильных землетрясений на 1-4 суток.

Распределение интенсивных спектральных составляющих на частотной оси, определенное по месячным данным, соответствовало установленному ранее ста-

тистическому спектру. Зарегистрировано возбуждение собственного колебания Земли второй степени.

Как видно из приведенных выше результатов исследований ученых Петербургского Университета, они полностью согласуются с полученными нами результатами регистрации неприливных вариаций силы тяжести перед сильными землетрясениями, а также записей торсионного детектора ATROPATENA, позволяющего регистрировать три пространственные составляющие гравитационного поля по осям X, Y, Z.

Исследования американских геофизиков Ф.Ф. Поллитца и Р. Бюргмана (Pollitz, Burgmann; Калифорнийский университет, Дэвис, США) и сейсмолога Б. Романович (Romanowicz; Калифорнийский университет, Беркли, США) показали, что тектонические напряжения могут распространяться на большие расстояния и проявляться со значительной задержкой во времени. Исследователи построили компьютерную модель передачи напряжений и установили, что мощные землетрясения, происходившие в 50-60-х годах на крайнем севере Тихого океана, по всей видимости, возбудили серию волн напряжения в земной коре, которые в 80-х годах привели к усилению сейсмической активности далеко на юге - в штате Калифорния. По мнению вышеуказанных ученых, волны напряжения передаются по астеносфере. При скольжении по поверхности астеносферы литосферные плиты вступают временами во взаимодействие; края одной зацепляют другую, и возникает напряжение, которое в конце концов разряжается подземным толчком. Он перераспределяет местное напряжение по-новому, увеличивая его в одном районе и ослабляя в другом. Характерный тому пример - четыре мощных землетрясения, наблюдавшихся между 1952 и 1965 гг. в пределах Алеутской островной дуги и п-ова Камчатка, т.е. как раз там, где Тихоокеанская плита погружается под Северо-Американскую. После каждого толчка Тихоокеанская плита «переприспособливалась» к новому взаиморасположению плит, растягиваясь и возбуждая перетекание масс в лежащей под ней астеносфере. В результате по астеносфере распространялась деформационная волна, передавая дальше то напряжение, которое первоначально было вызвано землетрясением при столкновении плит.

Согласно построенной авторами математической модели, волны напряжения, порожденные землетрясением в крайней северной части Тихого океана, перемещались как к югу, так и к северу, в пределы Ледовитого океана, со скоростью, зависящей от вязкости астеносферы. Введенные в модель реальные данные по вязкости пород показали, что пик волны напряжения должен был достигнуть восточной области Ледовитого океана в 70-х годах, пройти через канадскую провинцию Британская Колумбия около 1975 г. и вступить на территорию Калифорнии около 1985 г. Где бы эта волна ни проходила, она везде ускоряла движение плит и стимулировала сейсмическую активность. По мнению исследователей, этим и объясняется всплеск землетрясений с $M > 5$ по шкале Рихтера, который наблюдался в 80-х годах в восточной части Арктического бассейна. Продвижение подобных волн, измеряемое всего лишь несколькими миллиметрами в год, прослеживается

южнее по пульсирующей сейсмической активности, наблюдавшейся в северной части Калифорнии в 70-х, а в южной - в 80-х годах (Природа, №4, 1999).

Не только время наступления повышенной сейсмической активности, но и форма ее проявления зависят, по мнению авторов, от характера волны напряжения. В южной части Калифорнии сейсмические процессы на разломах протекали иначе, чем в известном разломе Сан-Андреас: в первом случае бортовые стенки разломов двигались главным образом вверх и вниз, а не в стороны. Этот факт отметили еще в 1995 г. сейсмологи Ф. Пресс и К. Аллен (Press, Allen; Калифорнийский технологический институт, Пасадена). Но должного объяснения такому факту тогда найдено не было (Science, 1998. V.280. 5367., USA, P.1194).

В работе И.И. Степанова (2002) приведены чрезвычайно важные, на наш взгляд, результаты исследований по мониторингу объемных деформаций с помощью геохимического деформометра в районе Авачинского залива. Принцип, положенный в основу деформометра, опирается на открытие И.И. Степановым особого состояния атомов некоторых химически инертных элементов, способных находиться в объеме кристаллических решеток минералов, сходного в некоторых отношениях с идеальным газом и поэтому называемого «квазигазообразным». По мнению И.И. Степанова, такие вещества способны играть роль чувствительных индикаторов величины деформаций кристаллических решеток минералов. При уменьшении объема решетки внутри нее возрастает парциальное давление этого «квазигаса». Поскольку этот процесс в первом приближении можно считать адиабатическим, часть атомов приобретает дополнительную энергию и получает возможность преодолеть потенциальный барьер, существующий на границах раздела решетка-окружающее открытое пространство. Если система минерал-окружающая атмосфера замкнута, то в ней равновесное состояние изменится в сторону повышения концентрации паров данного вещества в газе над минералом. Это состояние обратимо, и при увеличении объема кристаллической решетки минерала "вытесненные" из нее атомы возвращаются в минерал. Таким образом, непрерывно измеряя содержание атомов данного элемента в газе над минералом, можно судить о степени деформаций минерала. При достаточно низком пределе обнаружения измерительного устройства оказывается возможной регистрация малых деформаций, порядка 10^{-6} , или меньше.

В.В. Ружич (Институт Земной коры, Иркутск, устное сообщение, 1998 г.) выдвинул гипотезу, согласно которой каждое землетрясение сопровождается генерацией продольных волн с чрезвычайно низкой скоростью распространения ($V < 0,1$ м/сек). (Автор этого доклада дал им название - медленные деформационные волны (МДВ)). Этой гипотезе хорошо соответствует контрастная деформационная аномалия, зафиксированная И.И.Степановым 27.06.1998 г, через 26 суток после Шипунского землетрясения 1 июня (состоящая из 3-х контрастных одиночных импульсов с амплитудами 92, 140 и 43 усл.ед и интервалами между ними около 7 часов). Она позволяет оценить скорость распространения МДВ около 0,05 м/сек. На повышенном фоне объемных деформаций в день заметных

землетрясений, за 1,5-24 часа до события, наблюдаются единичные импульсные сигналы, превышающие фон в 2-3 и более раза. Например, 1 июня 1988 г было зафиксировано 2 таких сигнала с амплитудами 38 усл.ед. за сутки и 41 усл.ед. за 1,5 часа до события. А 27.08.2000 перед более слабым событием отмечено тоже 2 импульсных сигнала: 68 усл.ед. - за 6,5 часа и 40 ед. - за 3,5 часа до землетрясения, при фоне около 20 ед. Это позволяет предположить, что такие импульсные сигналы на повышенном фоне могут играть роль краткосрочных предвестников перед сильными сейсмическими событиями.

И.И. Степанов в своих исследованиях отмечает, что «обзор накопленной за 4 года мониторинга информации о поведении объемных деформаций показывает, что деформационные возмущения наблюдаются намного чаще фиксируемых сейсмических событий класса >12 . По всей вероятности, "тихое" рассеяние накопленной тектонической энергии происходит вследствие крипа. Поскольку при этом генерируются только низкочастотные колебания ($<10^{-3}$ Гц), такие процессы современными сейсмометрами не фиксируются». В пользу этой гипотезы свидетельствуют регистрируемые через 20-25 суток после угасания каждого деформационного возмущения импульсные сигналы, идентифицируемые как МДВ.

В.Г. Быков отводит большую роль в сейсмической активизации глубинных разломов деформационным волнам. Им предлагается модель инициирования сейсмической подвижки в неоднородном разломе земной коры (Быков, 2000, 2005).

Интересные расчеты были проведены Б.И. Биргером и С.М. Ковтуненко (1984), которые, решая задачу термоконвективной неустойчивости Земли, моделировали ее как двухслойную, по реологическим свойствам, систему. Верхний упругий слой (литосфера) лежит на однородной мантии, реология которой подчиняется закону Андраде, описывающему неуставившуюся ползучесть. Поскольку температура в системе меняется, эта граница является подвижной. Режиму пороговой конвективной неустойчивости, который реализуется в Земле при принятых оценках ее физических параметров, соответствуют возмущения в виде незатухающих термоконвективных волн. Найдены поля напряжений, деформаций и температур в литосфере и мантии, а также смещения земной поверхности и поверхности раздела литосфера-мантия, возникающие при распространении термоконвективной волны. Результаты этих исследований привели указанных авторов к выводу, что термоконвективные волны создают в литосфере напряжения, достигающие 3 кбар, даже при смещениях земной поверхности, не превышающих 1 км.

Весьма интересными, с точки зрения исследования волновой передачи тектонической энергии, представляются результаты и выкладки Н.А. Касьяновой (2003). Так, на основе детального анализа пространственно-временного распределения землетрясений в пределах Синайского полуострова и залива Акаба, была установлена миграция сейсмической энергии с 1976 года в направлении с востока на запад, а с 1983 г. - с севера на юг. Субмеридиональная волна тектонического напряжения распространялась со скоростью 27-110 км/год, субширотная - 7-

30 км/год. Сравнительный анализ результатов изучения пространственно-временных особенностей распределения сейсмотектонического напряжения в земной коре в пределах территории Кавказского региона и северо-западной части Аравийского полуострова, проведенный Н.А. Касьяновой, позволил ей обнаружить синхронное изменение динамики сейсмотектонического режима и сходство скоростей азимутального распространения сейсмической энергии в земной коре в пределах этих территорий. На основе своих исследований Н.А. Касьянова приходит к выводу и переносу сейсмической энергии в данных регионах посредством тектонических волн.

Весьма нестандартный подход к изучению деформационных волн рассмотрен в работе группы исследователей (Учитель и др., 2000), установивших, что «пространственно-временная изменчивость аварий газопроводов отражает, с одной стороны, деформационные процессы пластического характера, связанные с прохождением приливов в твердом теле Земли, и, с другой стороны, перед- (пост-) сейсмические деформационные процессы, отражающие моменты перехода от пластических деформаций к разрывным». По мнению исследователей, наиболее часто аварии происходят вдоль линий, азимуты которых согласуются с азимутами простираения зон делимости земной коры на блоки. «Деформационные волны,двигающиеся в направлении, соответствующем одному из азимутов блоковой делимости литосферы (отражающиеся линеаментами облачного покрова), обычно трассируются линейно связанными авариями газопроводов той же ориентированности. Характерно, что разгерметизация газопроводов происходит обычно в тех районах, которые по морфоструктурным признакам согласуются (совпадают либо перпендикулярны) с направленностью фронта деформационной волны». Эта концепция подтверждается и наблюдениями за аварийностью на магистральных трубопроводах, где аварии происходят только в том случае, если трубопровод пересекает геодинамическую линию вкрест простираения (Мычак и др., 2001).

На наличие пространственно-временной взаимосвязи сильных и слабых землетрясений указывают в своей работе Д. Мэрсэн и О. Линглин (Marsan, Leingline, 2008). В частности, ими сделана попытка привести причинно-следственную структуру последовательной каскадной взаимосвязи очагов сильных и слабых землетрясений.

В работах И.П. Добровольского (2005) приводится анализ гравитационных предвестников сильных землетрясений, при этом он указывает, что гравитационные предвестники являются следствием деформирования среды при подготовке тектонического землетрясения. Ruihao и Zhaozhu в 1983 году отмечали, что перед Тяньшанским землетрясением в Китае 28.07.1976 с магнитудой 7,8 максимальная аномалия в эпицентральной зоне составила 90 мкГал. В то же время Druta в 1982 году отмечал, что на эпицентральных расстояниях около 100 км и магнитудах $2 < M < 4$ обнаружены гравитационные аномалии в 15-200 мкГал. По мнению С.И. Зубкова (2002), эти расстояния почти на порядок выше известной оценки радиуса зоны проявления предвестников, равного $10^{\circ-4M}$ км. И.П. Добровольский (2005)

считает, что основной вклад в предвестниковую вариацию силы тяжести вносят вертикальные перемещения земной поверхности.

Изучение гравитограммы, полученной торсионным детектором ATROPATENA, позволило установить ряд интересных и важных особенностей в пространственно-временных вариациях гравитационного поля.

На рис. 143 приведена гравитограмма, записанная с 1 апреля по 31 декабря 2007 г.

Проводя анализ гравитограммы, мы будем опираться на результаты интерпретации, описанные в предыдущем разделе. Как нами уже было отмечено, во многих случаях сильным землетрясениям предшествует запись гравитационных аномалий (вариаций гравитационного поля), причем сенсоры записывают эти аномалии последовательно, со смещениями во времени - сначала аномалия проявляется в записи сенсора Y, затем сенсора Z и, наконец, сенсора X, при этом разница во времени между записями аномалии сенсорами Y и Z составляет 3-6 дней, и такая же разница во времени наблюдается между записями аномалии сенсорами Z и X.

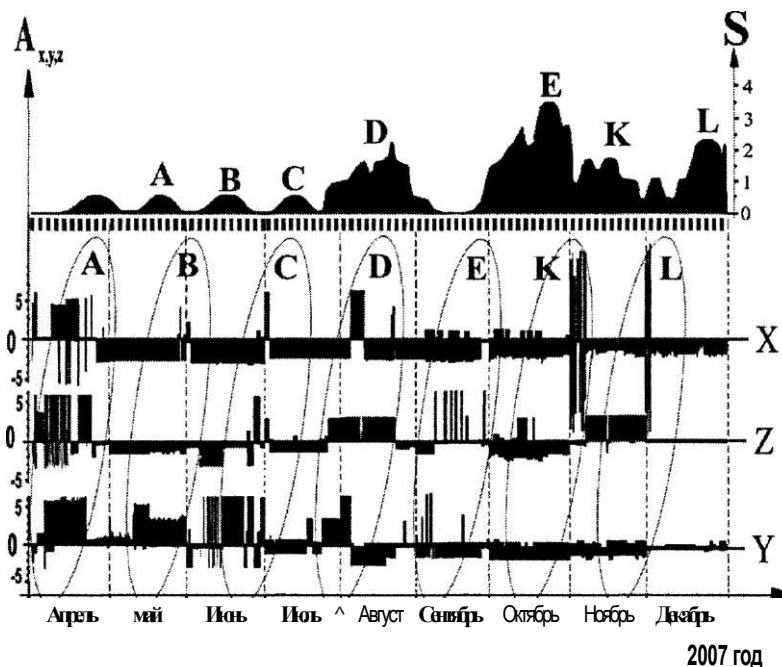


Рис. 143. Гравитограмма, записанная торсионным детектором ATROPATENA за период с 1 апреля по 31 декабря 2007 г.

A_{xyz} - безразмерный индекс, характеризующий амплитуду отклонения коромысел с малыми грузами по осям X и Y, а также вертикальные отклонения пробной массы, отражающее вариации ускорения силы тяжести по оси Z; T - ось времени. S - график сейсмической активности восточного полушария, где по оси S показан индекс сейсмической активности

Таким образом, общая разница во времени между записями аномалий от сенсора Y до сенсора X составляет 6-14 дней.

На графике выделены области «А», «В», «С», «D», «Е», «К», «Б» в пределах которых ярко выражены смещения во времени записей гравитационных аномалий от сенсора Y до сенсора X. Наиболее четко проявляется эта закономерность в зонах «А», «С», «D» и «Е». В зонах «В», «К» и «L» аномалии проявляются не на всех сенсорах. Так, в зоне «В» активная аномалия проявилась в записях сенсоров Y и X, в зоне «К» интенсивная аномалия проявляется на записи сенсора X и менее интенсивная - на записи сенсора Z. Для зоны «Б» ярко выраженная аномалия записана сенсором X и менее интенсивная - сенсором Z.

К каждой из зон гравитационных аномалий нами приурочена зона сейсмической активности на графике S (см. рис. 143.).

График сейсмической активности отражает усредненное число сильных землетрясений, произошедших в восточном полушарии с апреля по 31 декабря 2007 г., он построен с применением метода скользящей средней. Сглаживание производилось путем последовательного усреднения дважды скользящими 7- и 9-дневными средними. В результате примененной методики усреднения график смещен вперед на 7 дней.

Зоны сейсмической активности обозначены нами аналогично зонам гравитационных аномалий «А», «В», «С», «D», «Е», «К», «Б», при этом подразумевается, что каждой одноименной зоне сейсмической активности предшествует соответствующая зона гравитационных аномалий.

Как видно из графика, даже визуальный анализ позволяет не только констатировать ярко выраженное смещение аномалий во времени относительно друг друга по осям Y, Z и X, но и высокую корреляцию зон гравитационных аномалий и зон сейсмической активности со смещением во времени.

На наш взгляд, предварительные результаты интерпретации гравитограммы позволяют предположить, что зоны гравитационных аномалий отражают прохождение под станцией ATROPATENA тектонических волн, которые не могут быть зарегистрированы обычными сейсмическими станциями, но прекрасно регистрируются торсионным детектором длиннопериодных гравитационных вариаций.

Действительно, можно предположить, что при прохождении первого полупериода тектонической волны активизируется сенсор Y, затем, в момент смены полупериодов тектонической волны, в результате появления области повышенной или пониженной плотности под станцией, активизируется сенсор Z, и при появлении второй полуволны активизируется сенсор X.

Если обратить внимание на запись сенсора Z, то можно заметить, что во многих случаях на записи этого сенсора гравитационные аномалии проявляются как в положительных, так и в отрицательных областях, при этом в пределах одной аномалии происходит смена знака. Ярко выраженная смена знака в аномалии наблюдается в областях «А», «С», «D», «Е», «К».

Различные полупериоды тектонической волны по разному будут влиять на сенсоры детектора, ориентированные взаимно перпендикулярно. Это вполне обосновывается физически, ибо гравитационное поле является квадрупольным, а, следовательно, сильно избирательным по направлению к источнику гравитационного возмущения. Конструкция сенсоров также рассчитана на максимальную избирательность в зависимости от направления источника гравитационного возмущения.

Другим, не менее логичным, объяснением последовательной активизации различных сенсоров детектора может быть последовательная регистрация сначала продольной волны, обладающей большей скоростью, чем поперечная, и приходящей к регистрирующей станции раньше поперечной, а затем поперечной волны. В зависимости от направления прихода тектонических волн, сенсоры могут вести себя по-разному.

Таким образом, торсионный детектор ATROPATENA, по нашему мнению, регистрирует гравитационные возмущения, порождаемые проходящими под детектором тектоническими волнами, изменяющими плотность толщи горных пород в пределах фронта волны. Различные фазы тектонической волны вызывают знакопеременное изменение плотности, при этом картина может усложняться наличием как продольных, так и поперечных тектонических волн.

Если предположить, что детектор ATROPATENA является инструментом, позволяющим регистрировать тектонические волны, то остается по-прежнему неясным вопрос: «что является источником тектонических волн». Эта проблема является ключевой при рассмотрении не только возможности создания новых методов прогнозирования землетрясений на основе регистрации тектонических волн, но и с точки зрения выяснения некоторых фундаментальных аспектов. Ведь совершенно очевидно, что тектонические волны и сами могут быть причиной землетрясений, провоцируя подвижки в зонах глубинных разломов или становясь «последней каплей» в областях накопленных критических напряжений в земной коре.

Таким образом, рассмотрим три возможных источника тектонических волн.

1. Тектонические волны излучаются на границе ядро-мантия, предположительно в слое «D», во время очередного выплеска глубинной энергии. При этом, порождаемые энергетическим импульсом тектонические волны перемещаются вверх и, доходя до литосферы, продолжают распространение в ее пределах, активизируя очаги землетрясений с критическими напряжениями. В момент подхода этих волн к регистрирующей станции начинается процесс активизации сейсмических очагов, приводящей к землетрясениям.

2. Тектонические волны излучаются очагами сильных землетрясений в момент достижения в них критических напряжений, приводящих к началу интенсивных деформаций. Эти деформации и являются источником тектонических волн, распространяющихся от очага землетрясения.

3. Вторичные тектонические волны возникают после сильных землетрясений в результате значительных деформаций в очаговой зоне землетрясений. На наличие такого механизма образования тектонических волн также указывают наблюдения ряда исследователей, отмечающих так называемую миграцию очагов землетрясения от направления сильного землетрясения, преимущественно вдоль глубинных разломов земной коры.

Для ответа на поставленные вопросы необходима постановка специальных исследований с использованием как минимум трех станций ATROPATENA, размещенных на большом расстоянии друг от друга, не менее 2-3 тысяч км.

5.5. ЧТО РЕГИСТРИРУЕТ ATROPATENA?

В предыдущем разделе нами был рассмотрен принципиально новый геофизический метод мониторинга гравитационного поля Земли с помощью так называемой станции ATROPATENA, позволившей зарегистрировать необычные вариации гравитационного поля перед сильными удаленными землетрясениями. Результаты интерпретации «гравитограмм» позволили авторам выдвинуть предположение, что зарегистрированные аномалии отражают тектонические волны. Безусловно, можно дискутировать по поводу природы тектонических волн и их источников, и даже по самому факту их регистрации. Между тем, факт регистрации длиннопериодных гравитационных вариаций является неоспоримым.

Попробуем разобраться, а что, собственно говоря, на самом деле регистрирует ATROPATENA?

Физический принцип действия станции ATROPATENA был детально рассмотрен в предыдущих разделах. По сути, эта станция представляет собой два экземпляра совершенно идентичных классических весов Кавендиша для измерения гравитационной постоянной, размещенных в одном корпусе и ориентированных взаимно перпендикулярно, а также помещенный в этом же корпусе высокоточный гравиметр.

Если исходить из классических представлений фундаментальной физики, этот прибор является абсолютно бессмысленным, так как считается неоспоримым, что гравитационная постоянная - мировая константа и не может меняться во времени или в пространстве. Еще более бессмысленной кажется попытка непрерывного измерения во времени гравитационной постоянной в различных направлениях.

Между тем, ATROPATENA зарегистрировала многочисленные сигналы, которые, как было показано выше, имеют определенные закономерности и высокую корреляцию с крупномасштабными геодинамическими событиями. Но наиболее интересным и, на первый взгляд, наиболее абсурдным, является тот факт, что в одни и те же моменты времени весы Кавендиша, ориентированные взаимно пер-

пендикулярно, регистрировали совершенно различные аномалии, порой никак не коррелируемые друг с другом, либо имеющие обратную корреляцию.

Если несколько отойти от довлеющих над нами догм фундаментальной физики и взглянуть на эти результаты через призму геофизики и геодинамики, то многое прояснится и окажется достаточно просто объяснимым, при этом основы фундаментальной физики, да и сама гравитационная постоянная, останутся непоколебимыми.

Исходя из положений общей теории относительности, по своей природе гравитационное взаимодействие представляет собой изменение кривизны пространства, вызываемое массами и являющееся их неотъемлемым свойством.

В весах Кавендиша происходит взаимодействие малых масс на концах коромысла, подвешенного на тонкой нити с большими массами, что вызывает поворот коромысел вокруг своей оси на некоторый угол. Угол поворота коромысла компенсируется силой упругости кручения нити, по величине которой и вычисляется гравитационная постоянная. Но если рядом с этой системой появляются другие большие массы, то они вносят дополнительные искажения в кривизну пространства, образованного большими массами в весах Кавендиша. Таким образом, мы будем иметь новую систему взаимодействующих масс, в которой кривизна пространства будет являться результирующей для масс в весах Кавендиша и дополнительной массы. В этом случае весы Кавендиша покажут иной результат.

В условиях Земли существует множество геодинамических факторов, которые создают достаточно интенсивные гравитационные аномалии, изменяющиеся в пространстве и во времени и многократно превышающие гравитационные эффекты, вызываемые движением планет солнечной системы, включая суммарный эффект лунно-солнечных приливов. Эти эффекты могут быть вызваны конвективными течениями в мантии, движением литосферных плит, тектоническими волнами и т.д. Кстати, наблюдаемые эффекты могут быть также вызваны прохождением через Землю сверхдлинных гравитационных волн космического происхождения, имеющих высокую амплитуду.

На наш взгляд, именно таким образом можно объяснить тот факт, что на протяжении последних десятилетий, несмотря на постоянное повышение точности приборов, регистрирующих гравитационную постоянную G вплоть до шестого знака после запятой, тем не менее не удается зарегистрировать G с точностью выше третьего знака после запятой, о чем свидетельствуют ежегодно публикуемые данные CODATA.

На рис. 144. показано схематическое изображение фактической ориентации весов Кавендиша в станции ATROPATENA. Изображение представляет собой вид сверху, X и Y обозначают соответствующим образом ориентированные коромысла с малыми массами на концах, m_1 и m_2 - большие массы.

В предыдущем разделе при интерпретации гравитограмм были использованы интегрированные значения длиннопериодных гравитационных вариаций. Между

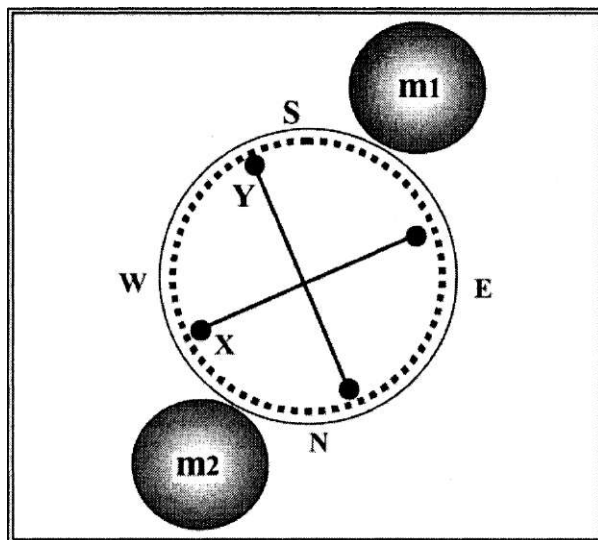


Рис. 144 . Схематическое изображение фактической ориентации весов Кавендиша в станции ATROPATENA

тем, более детальное изучение отдельно взятых гравитационных сигналов может прояснить более тонкие физические нюансы.

Хотим напомнить, что на гравитограммах график G_x отражает движение коромысла X на рис. 144, а график G_y - движение коромысла Y (см. рис. 144), график G_z отражает изменение силы тяжести, т.е. вертикальные смещения пробной массы. Причем увеличение значений G_x и G_y означает сближение малых масс на коромыслах с большими массами, а снижение - удаление от больших масс. По оси ординат показаны условные единицы, отражающие амплитуду отклонения малых масс на концах коромысел относительно больших масс.

Регистрация значений всех трех сенсоров осуществляется с дискретностью в одну секунду. Использование красных лазеров, сфокусированных в узкие лучи, и специальных оптических матриц для регистрации лазерной метки и ее перемещений, позволяет регистрировать отклонения коромысел до 0,1 мм. Весь процесс регистрации происходит в цифровом виде автоматически, без участия оператора, а получаемые временные ряды архивируются с помощью специальной программы. Доступ к архивам станции и наблюдение за процессом в реальном масштабе времени производится дистанционно по локальной сети или с помощью ИНТЕРНЕТ, при наличии пароля доступа.

Мы хотим также напомнить, что эти отклонения соответствуют вариациям гравитационной постоянной G в третьем и четвертом знаках после запятой.

На рис. 145. приведены гравитограммы с двумя гравитационными аномалиями, зарегистрированными 5 января и 10 января 2008 г. Необходимо отметить, что эти аномалии предшествовали двум ощутимым землетрясениям - в Индо-

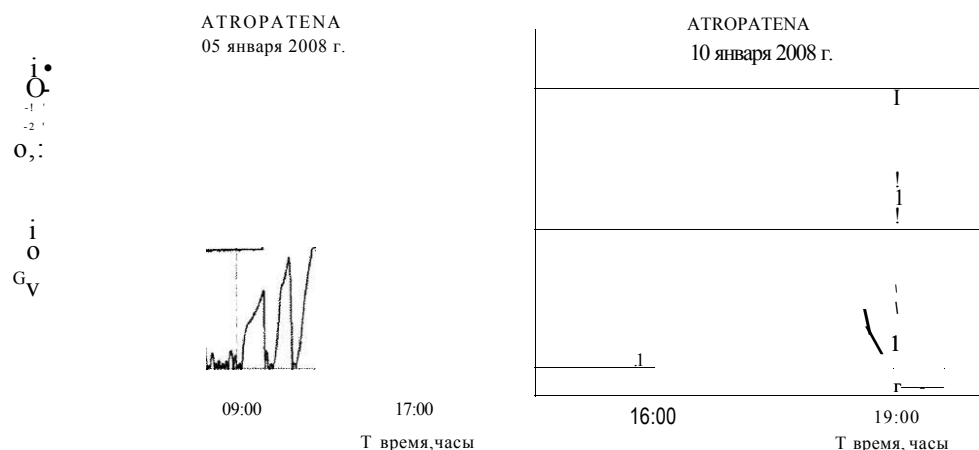


Рис. 145. Гравитограммы за 5 и 10 января 2008 г.

незии с Мб от 07 января 2008 г. и в районе островов Фуджи с Мб,5 от 15 января 2008 г.

Как видно на гравитограмме от 5 января, в то время как малые массы коромысла X удаляются от больших масс (G_x уменьшается), массы коромысла и G_y сближаются, причем со значительно большей амплитудой (G_y увеличивается). В то же время G_z также показывает увеличение силы тяжести почти синхронно с G_y . Примечателен также факт запаздывания начала изменений G_z и G_X относительно G_Y на 64 минуты. В то же время G_z возвращается в прежнее положение на 30 минут позже G_v , тогда как G_x - на 2,5 часа позже G_y . Мы видим, что все три сенсора показывают ярко выраженный гравитационный сигнал, явно имеющий одну и ту же природу, но имеют место существенные смещения во времени его регистрации. Период сигнала также достаточно длителен и составляет 8 часов.

Интересен и другой пример регистрации достаточно интенсивной вариации во времени гравитационного поля, со строгой избирательностью по направлению. Этот сигнал зарегистрирован только сенсором G_r . Два других сенсора, как видно из гравитограммы, «упорно молчат». Период сигнала составляет три часа.

На рис. 146. показаны гравитограммы за 16 и 20 января 2008 г. Сначала рассмотрим гравитограмму от 16 января. В связи с отсутствием сигналов G_z этот график не демонстрируется. С 10-00 начинается практически синхронно снижение значения G_x и увеличение G_r . Как видно, существует некоторое различие в форме графиков G_x и G_v , но при этом общая тенденция, показывающая высокую отрицательную корреляцию, не вызывает сомнений.

Графики фактически зеркально отображают друг друга. Т.е. в то время как малые массы коромысла X удаляются от больших масс, массы на концах коромысла

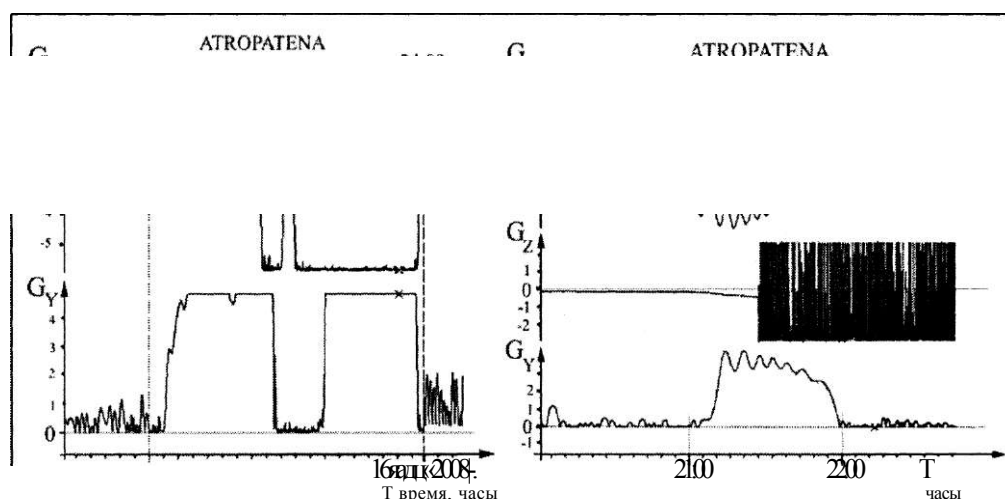


Рис. 146. Гравитограммы за 16 и 20 января 2008 г.

Y сближаются, и то же самое происходит в обратном направлении. Общий период наблюдаемого сигнала составляет 14 часов. За 20 января зарегистрирован также достаточно интересный сигнал, при котором графики G_x и G_y также регистрируют в течение 2-х часов сигнал, почти зеркально отображенный на обеих гравитограммах. Между тем, примерно через час после появления данного сигнала, G_z начинает непрерывно регистрировать высокочастотный квазигармонический сигнал с периодом 4-8 минут. После прекращения регистрации сигнала сенсорами G_x и G_y , G_z продолжает регистрировать высокочастотный сигнал вплоть до 23 января включительно, причем такая длительность непрерывного проявления сигнала является весьма необычной для сенсора G_z . 22 января происходит достаточно сильное землетрясение в Индонезии с $M_b 4$.

2-3 февраля и 4-5 февраля 2008 г. зарегистрированы длиннопериодные гравитационные вариации, которые можно рассматривать в качестве характерных предвестников удаленных сильных землетрясений (рис. 147).

На гравитограммах за 2-3 февраля зарегистрированы весьма интересные аномалии. Если G_Y зарегистрировал три последовательно чередующихся длиннопериодных сигнала, с периодами, соответственно 11, 8 и 7 часов, то G_X зарегистрировал зеркальное отображение этих же сигналов, но при этом первый и второй из них модулированы высокочастотной составляющей с периодом 4-9 минут, причем модулирующий высокочастотный сигнал в обоих случаях длится около 5 часов.

4-5 февраля опять на гравитограмме проявляется характерный сигнал, по характеру напоминающий сигнал за 2-3 февраля, но при этом гравитационный сигнал G_x модулирован высокочастотной составляющей с периодом 4-9 минут

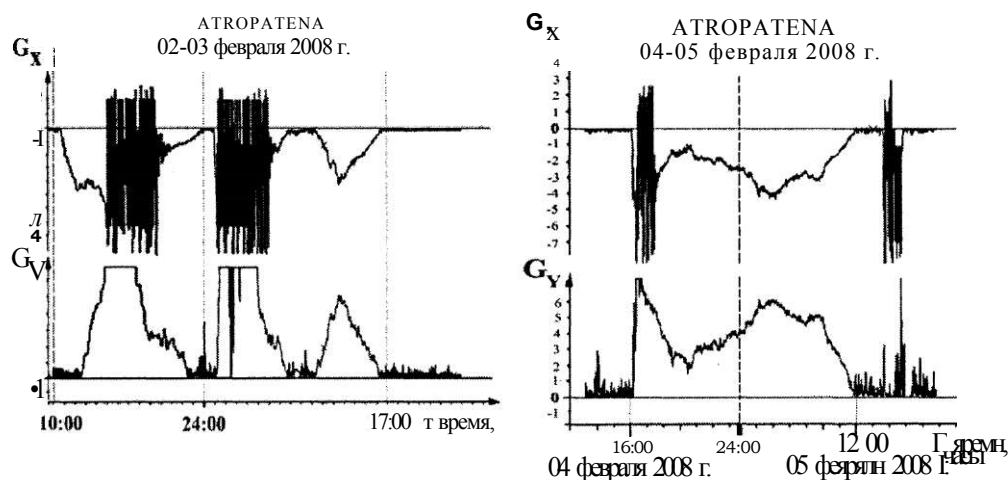


Рис. 147. Гравитограммы за 2-3 и 4-5 февраля 2008 г.

в начале и в конце аномалии. Продолжительность модулирующего сигнала приблизительно одинакова и составляет около 2 часов. Этот факт весьма интересен, так как сигнал G_x четко ограничен в начале и конце высокочастотной составляющей. 08 февраля происходит сильное землетрясение с $M7,2$ в районе северного срединно-океанического хребта в центральной части Атлантического океана (10.725 N; 41.898 W). 10 февраля происходит сильное землетрясение с $M6,5$ в области южных Сандвичевых островов (60.757 S; 25.582 W). По нашему мнению, аномалии, зарегистрированные 2-3 января и 4-5 января 2008 г., являются ярко выраженными предвестниками произошедших сильных землетрясений.

Анализ результатов будет неполным, если мы не покажем результаты регистрации записей АТРОПАТЕНА перед Японскими и Китайскими землетрясениями в мае 2008 г.

7 мая 2008 г. около побережья Хонсю в Японии произошли два сильных землетрясения: первое в 16:02:01 с $M6,2$ (координаты 36.21S 141.47E) и второе в 16:45:20 с $M6,8$ (координаты 36.14S 141.45E). Анализ записи АТРОПАТЕНА показал, что 2 мая сенсор G_x начал регистрировать интенсивную отрицательную аномалию «А» (рис. 148), которая длилась до 3 мая 04:25. Через 2 часа после этой аномалии сенсор G_x зарегистрировал вторую отрицательную аномалию «В», которая длилась до 5 мая. Примечательно, что эти аномалии представляют собой пачки высокочастотных импульсов с периодами 3,5-6,5 минут. 7 мая 2008 произошли два сильных землетрясения в Японии, с небольшой разницей во времени. Таким образом, землетрясения произошли через 5 дней после начала записи аномалии и через два дня после того, как аномалия прекратилась.

12 мая 2008 г. в Китае в районе Сичуань в 06:28:00 произошло катастрофическое землетрясение с $M8$ (координаты 31.08S 103.27E), и в 06:43:14 произошло

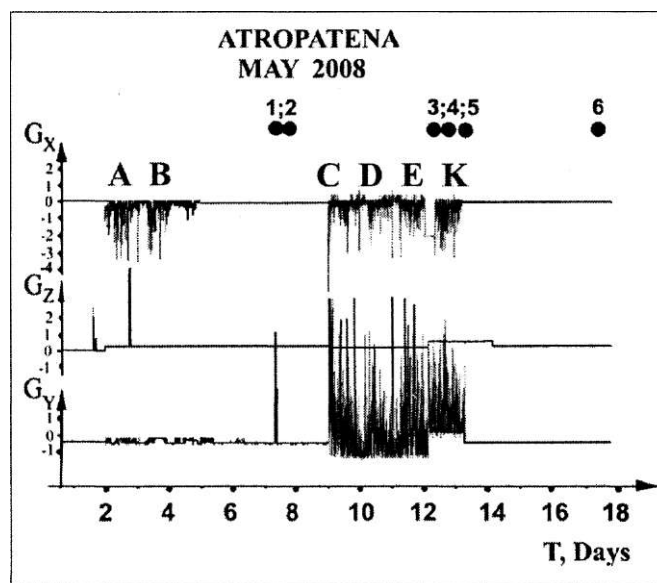


Рис. 148. Гравитограмма с 1 по 17 мая 2008

A, B, C, D, E, K - зарегистрированные аномалии гравитационного поля; 1; 2 - землетрясения в Японии около побережья Хонсю 07 мая 2008 г. с М 6.2 (время - 16-02-01) и М 6.8 (время - 16-45-20); 3;4;5;6 - землетрясения в Китае, Сичуань, 12 мая 2008 с М8 (время - 06-28-00); с М6.3 (время - 06-43-14); Сичуань 13 мая 2008 с М5,9 (время - 07-07-09); Сичуань 17 мая 2008 с М6,0 (время - 17-08-25)

второе землетрясение с М6,3 (координаты 31.25S 103.68E), в результате которых погибло, по предварительным данным, около 70 тысяч человек, и в настоящее время число погибших уточняется.

9 мая сразу два сенсора G_x и G_y начали регистрировать сильные аномалии «С» гравитационного поля, причем G_y зарегистрировал интенсивную положительную аномалию, состоящую из пачки высокочастотных импульсов с периодами 3,5-8 минут, а G_x - отрицательную, состоящую из пачки импульсов с аналогичными периодами. Амплитуда аномалии G_y более чем в три раза превышает амплитуду аномалии G_x . Аномалии G_y при визуальном анализе состоят из четырех хорошо выделяемых по амплитудной модуляции пачек импульсов (аномалий) - C, D, E, K.

Аномалия К отличается от аномалий C, D, E по нескольким признакам. Во-первых, на G_x после завершения аномалии E наблюдается снижение показаний на две условные единицы, которое длится в течение 15 часов без модуляции, и после возвращения показаний к фоновому значению начинается запись аномалии К. Аномалия К начинается в 15-22 12 мая и завершается в 09-30 13 мая. Во-вторых, на G_y аномалия К также отличается от предыдущих аномалий. Аномалия К начинается 12 мая и завершается в 10-55 13 мая причем нижний предел значений

аномалии К выше нижнего предела аномалий С, D, Е примерно на две единицы. После завершения аномалии К значения записи возвращаются до фонового уровня.

Таким образом, по нашему мнению, аномалии С и D (см. рис. 148) являются предвестниками китайских землетрясений 3 и 4, Е и К являются предвестниками землетрясений 5 и 6.

Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемые аномалии перед землетрясениями в Японии и в Китае существенно отличаются своими характеристиками. Причины этих отличий и физическое обоснование наблюдаемых аномалий требует глубоких исследований и накопления статистической информации. Между тем, уже сейчас мы можем сделать определенные предположения.

Детектор ATROPATENA зарегистрировал одновременно отличающиеся друг от друга вариации G в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вариации Ag перед сильными удаленными землетрясениями с апреля 2007 г. по настоящее время в 93% случаев.

Для более точного определения координат будущего сильного землетрясения могут быть использованы два метода, первый из которых требует размещения как минимум трех станций ATROPATENA, разнесенных на большие расстояния друг от друга. И данная проблема находится в настоящее время на стадии разрешения, при этом базовая станция будет находиться в НИИ прогнозирования и изучения землетрясений (г. Баку), а две другие, соответственно, в г. Джокьякарта (Индонезия) и г. Исламабад (Пакистан). Завершение монтажа указанных станций запланировано на конец 2008 г. Создание подобной сети, по мнению авторов, позволит получать направление на источник излучения от каждой станции; место пересечения прямых, ориентированных по выявленным направлениям, будет показывать местоположение будущего землетрясения. Кроме того, создание сети станций ATROPATENA позволит ответить и на множество других вопросов, например, на вопросы о характере движения тектонических волн, их скоростях, амплитудах, коэффициенте затухания, энергоемкости, их воздействии на активизацию других очагов землетрясений, месте нахождения источника тектонических волн и т.д.

Второй метод может быть использован и при наличии всего одной станции ATROPATENA, он основан на создании базы данных характерных (эталонных) гравитационных сигналов на гравитограммах, предшествующих сильным землетрясениям. В основу этой идеи положено имеющее под собой серьезные фактические основания предположение, что каждый обособленный в геодинамическом плане регион имеет своеобразный характерный «отпечаток» в проявлениях гравитационного предвестника. Этот «отпечаток» зависит как от геодинамических и тектонических особенностей региона готовящегося землетрясения, так и от тектонической структуры и особенностей регионов, размещенных по пути следования тектонической волны (источника гравитационного сигнала) до регистрирующей станции. Кстати, в зависимости от места расположения регис-

трирующей станции ATROPATENA, могут меняться и эталонные «отпечатки» гравитационных предвестников. То есть не исключено, что для каждой станции ATROPATENA потребуется создание собственной эталонной базы «отпечатков» гравитационных предвестников. Между тем, на наш взгляд, второй метод хотя и является весьма интересным и обоснованным, но его точность будет ограничена достаточно большой площадью геодинамически обособленного региона.

Одним из наиболее важных фундаментальных выводов данного раздела является то, что ATROPATENA позволяет регистрировать аномальные изменения значений гравитационной постоянной G , отличающиеся друг от друга, в зависимости от ориентации весов Кавендиша. И основной причиной такого поведения G является влияние на показания весов Кавендиша глобальных геодинамических процессов на нашей планете. Эти влияния отражаются в показаниях G начиная с третьего знака после запятой. Это означает, что стандартными методами и приборами, в земных условиях G невозможно зарегистрировать с точностью, превышающей третий знак после запятой.

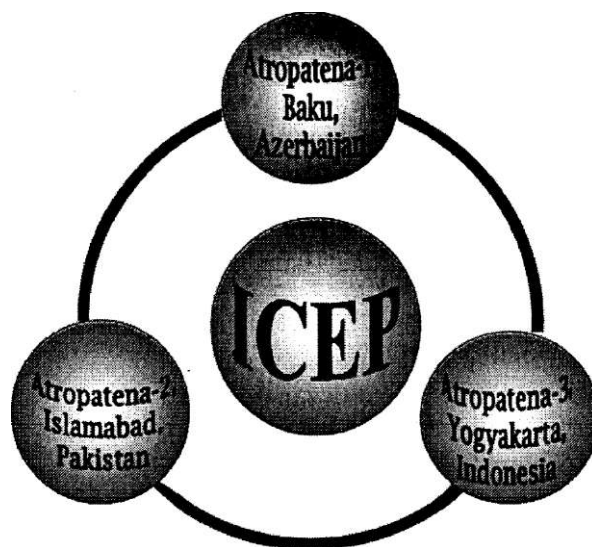
5.6. ПРОГРАММА МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ - ICER

Во время Международного Симпозиума «Природные катаклизмы и глобальные проблемы современной цивилизации», проходившего в г. Баку с 24 по 26 сентября 2007 г., было принято решение о создании Глобальной Международной Сети станций прогнозирования землетрясений ATROPATENA в рамках программы международного сотрудничества по прогнозированию землетрясений ICER - International Cooperation for Earthquakes Prediction. Первыми участниками данной программы явились Международная Академия Наук Н&Е (Иннсбрук, Австрия); Научно-исследовательский институт прогнозирования и изучения землетрясений (Баку, Азербайджан); Правительство Специальной Провинции Индонезии Yogyakarta (Yogyakarta, Indonesia); Пакистанская Академия Наук и Научный Центр Изучения Землетрясений Пакистана (Исламабад, Пакистан). Руководителем программы ICER избран проф. д.г.-м.н. Э.Н. Халилов.

ICER - INTERNATIONAL COOPERATION FOR EARTHQUAKE PREDICTION

ICER является открытой международной программой, к которой могут присоединяться новые члены, желающие участвовать в работе глобальной сети прогнозирования землетрясений ATROPATENA.

Таким образом, фактически сделан первый шаг в формировании Глобальной Международной Системы Прогнозирования Землетрясений.



Учитывая особую актуальность данной программы и возможность с ее помощью придать новый импульс в решении проблемы краткосрочного прогнозирования землетрясений, считаем целесообразным привести полный текст данной программы в настоящей книге.

ОТКРЫТАЯ ПРОГРАММА
Международного Научного Сотрудничества
ICEP - International Cooperation
for earthquake prediction
Международное Сотрудничество по
Прогнозированию Землетрясений

Используемые сокращения и условные обозначения:

УП- участник (и) программы;

ICEP - Международное Сотрудничество по Прогнозированию Землетрясений;

IGSFE - Международная Глобальная Система Прогнозирования Землетрясений;

BS - базовая станция прогнозирования землетрясений;

RS - региональные станции прогнозирования землетрясений;

BP- Board of the program;

ГНК - Главный Научный Консультант Программы;

ДП-Директор программы;

ATROPATENA - Станция прогнозирования землетрясений
ATROPATENA;

IAS - *International Academy of Science H&E*;

SRIFSE - *Scientific Research Institute of Forecasting and Studying of Earth-quakes*;

PAS - *Pakistan Academy of Science*;

CES - *Centre for Earthquake Studies of Pakistan*;

1. Участники Программы

Международная Академия Наук H&E - Президент проф. д-р. Вальтер Кофлер (Австрия).

Научно-исследовательский Институт Прогнозирования и Изучения Землетрясений Международной Академии Наук H&E - Генеральный Директор проф. д-р. Эльчин Халилов (Азербайджан).

Правительство Специального Региона Джокьякарта (Индонезия).

Пакистанская Академия Наук (Пакистан) - Президент д-р. Ишфаг Ахмад.

Центр Изучения Землетрясений (Пакистан) - Директор д-р Ахсан Мубарак.

2. Название Программы - *Международное Сотрудничество по Прогнозированию Землетрясений (Program: ICEP)*.

3. Актуальность

Ежегодно на нашей планете происходит несколько катастрофических и десятки сильных землетрясений. Землетрясения становятся причиной многочисленных человеческих жертв и наносят огромный материальный ущерб.

Можно выделить две основные причины многочисленных жертв при землетрясениях:

1. Строительство несейсмостойких зданий, разрушение которых при сильных землетрясениях приводят к гибели людей, оставшихся под обломками зданий;

2. Люди не знают - когда, где и какой силы произойдет землетрясение и бывают не готовы к природной катастрофе.

Если первый фактор во многом связан с материальным уровнем жизни людей, которые не имеют финансовых средств, чтобы строить сейсмостойкие дома, то второй фактор зависит только от эффективности развития технологий прогнозирования землетрясений.

Решение проблемы прогнозирования землетрясений позволит государственным службам и населению своевременно подготовиться к сильному землетрясению, привести в полную готовность технику и спасательные службы, перевести в специальный режим работы государственные органы (больницы и другие медицинские учреждения, службы пожарной охраны, полицию, системы связи и т.д.).

Прогноз землетрясений может быть трех типов:

- Долгосрочный прогноз землетрясений;
- Среднесрочный прогноз землетрясений;
- Краткосрочный прогноз землетрясений.

Долгосрочный прогноз землетрясений

Долгосрочный прогноз землетрясений дается на срок 5, 10 и более лет и предназначен для эффективного планирования развития различных регионов. В долгосрочном прогнозе указывается вероятность сильных землетрясений для различных территорий в течении длительных периодов времени. При планировании развития инфраструктуры различных районов, в зонах с наибольшим риском сильных землетрясений снижают масштабы строительства населенных пунктов и учреждений, опасных предприятий и объектов (химических, нефтеперерабатывающих, ядерных), которые при разрушении могут нанести значительный ущерб населению, государству и окружающей среде.

Среднесрочный прогноз землетрясений

Среднесрочный прогноз землетрясений предоставляется на период, примерно, от 1 месяца до 1 года и предназначен для того, чтобы заранее подготовить государственные органы управления, государственные спасательные службы, органы государственной безопасности, крупные предприятия и объекты, имеющие стратегическое значение или большую опасность в случае разрушения (нефтехимические предприятия, атомные электростанции, крупных хранилища опасных и токсичных веществ и т.д.).

Краткосрочный прогноз землетрясений

Краткосрочный прогноз землетрясений предоставляется за период от нескольких часов до нескольких недель до сильного землетрясения и предназначен для принятия экстренных мер приведения всех государственных органов управления и спасательных служб в полную готовность для спасения и эвакуации населения.

Все три типа прогноза предназначены только для государственных органов и не должны предоставляться непосредственно населению для избежания массовой паники, которая может существенно осложнить действия государственных органов и нанести большой материальный, физический и моральный ущерб.

4. Цели и задачи

4.1. Целью программы ICER является прогнозирование сильных и катастрофических землетрясений в любом регионе Земли.

4.2. Основными задачами программы являются:

- Изготовление и размещение в странах участников программы станций прогнозирования землетрясений ATROPATENA.

- Создание Международной Глобальной Международной Системы Прогнозирования Землетрясений.
- Создание международной системы информационной связи между станциями ATROPATENA с использованием ресурсов ИНТЕРНЕТ.
- Исследование гравитационных и других эффектов, предшествующих процессам подготовки сильных землетрясений на различных расстояниях от эпицентров землетрясений.
- Создание международной службы оперативного оповещения участников программы о возможном риске сильных землетрясений.
- Совершенствование существующих технологий прогнозирования землетрясений и создание новых технологий.
- Изучение геологических, геофизических, метеорологических, биологических и космических факторов, позволяющих прогнозировать землетрясения.

5. ICER - Программа Международного Сотрудничества по Прогнозированию Землетрясений

5.1. ICER представляет собой систему станций краткосрочного прогнозирования землетрясений ATROPATENA, связанных между собой в единую информационную инфраструктуру с использованием международной системы INTERNET или другой доступной системы международной информационной связи.

5.2. Центральной базой ICER является станция ATROPATENA, расположенная в г. Баку в Научно-исследовательском Институте прогнозирования и изучения землетрясений (Республика Азербайджан).

5.3. Дистанционное управление всеми станциями ATROPATENA может осуществляться непосредственно участниками программы, владеющими станциями, или от центральной станции.

5.4. Станция ATROPATENA в г. Баку является базовой станцией (BS), а все остальные станции - региональными станциями (RS).

5.5. Вся информация со всех станций ATROPATENA поступает на независимый центральный сервер в Канаде и дублируется на Европейский Сервер в Австрии. На базовой станции создается база данных, в которой хранится и архивируется информация записи всех станций ATROPATENA.

5.6. Действительные участники программы ICER имеют доступ к базам данных, имеющихся в центральном сервере в реальном масштабе времени (online).

5.7. Ассоциативные участники программы ICER имеют доступ только к архивным данным станций и к информации, помещаемой на INTERNET-сайте ICER.

5.8. Краткосрочный прогноз землетрясений может предоставляться только базовой станцией для всех действительных участников программы ICER.

5.9. Прогноз землетрясения предоставляется на основе" интерпретации данных, поступающих со всех станций ICER. При утверждении прогноза землетрясений принимаются во внимание результаты интерпретации всех участников программы ICER.

5.10. В составе программы ICER создается служба оперативного оповещения, которая может информировать государственные органы и научные учреждения страны, в отношении которой предоставляется прогноз.

5.11. Информация о прогнозе землетрясений является конфиденциальной и не может быть до землетрясения предоставлена населению или средствам массовой информации.

Архивная информация о прогнозе землетрясения, которое уже произошло, может быть предоставлена в средства массовой информации только на основании письменного согласия общего руководителя программы (ОРП).

6. Основные положения Программы

6.1. Участники программы создают Международную Глобальную Систему Прогнозирования Землетрясений (IGSFE).

6.2. В основе IGSFE предусмотрено использование Станций Прогнозирования Землетрясений ATROPATENA, разработанных и изготовленных Научно-исследовательским институтом прогнозирования и изучения землетрясений (SRIPSE) Международной Академии Наук Н&Е.

6.3. Программа IGSFE является открытой, то есть число участников программы может быть увеличено.

6.4. Новый участник программы принимается на основании заявления организации или частного лица, желающего стать УП, и решения ВР.

7. Руководство Программой

7.1. Высшим руководящим органом Программы IGSFE является Правление Программы (ВР).

7.2. Главным Научным Консультантом Программы (ГНК) IGSFE является Почетный Президент Международной Академии Наук Н&Е - Академик МАН и РАН, доктор геолого-минералогических наук, заслуженный профессор МГУ Виктор Ефимович Хаин.

7.3. Директором Программы (ДП) является Генеральный Директор Научно-исследовательского института прогнозирования и изучения землетрясений проф., д.г-м.н. Эльчин Халилов.

ДП осуществляет общее научно-методическое и административное руководство и координацию работ, выполняемых в рамках настоящей программы.

7.4. От каждого участника Программы утверждается Региональный Руководитель Программы (РРП), который одновременно является региональным заместителем ДП.

РРП осуществляет методическое и научное руководство и координацию работ в рамках программы IGSFE в регионе деятельности УП.

7.5. В состав Правления Программы входят ГНК, ДП и РРП.

7.6. Правление Программы осуществляет следующие функции:

- принимает решение о внесении изменений и дополнений в программу IGSFE;

- принимает решение о принятии действительных и ассоциативных участников программы;
- учреждает научные организации и специальные фонды для финансирования научных исследований в области прогнозирования землетрясений;
- принимает решение о включении в состав ВР новых членов правления с правом решающего голоса и наблюдателей;
- принимает решение о проведении международных конференций, симпозиумов, совещаний и других форумов.

8. Основные принципы сотрудничества

8.1. Полным владельцем интеллектуальной собственности - технологии прогнозирования землетрясений на основе станций ATROPATENA - является SRIFSE (Международный Патент PCT WO 2005/003818 A1. 13.01.2005, Женева, автор - Эльчин Халилов).

8.2. В программе предусмотрено два типа участников:

Действительные участники программы (full participants of the program - FP) и ассоциативные участники программы (associative participants of the program - AP).

8.2.1. FP - являются полными или частичными владельцами станции ATROPATENA в регионе своей деятельности и непосредственно выполняют работы по прогнозированию землетрясений с помощью имеющихся у них станций ATROPATENA.

FP - имеет online доступ к базе данных IGSFE посредством системы INTERNET и участвует в процессе изучения и интерпретации данных со всех станций ATROPATENA, является коллективным совладельцем первичной информации и базы данных IGSFE.

FP - назначает своего представителя Региональным Руководителем Программы, который входит в состав ВР.

FP - заключают двухсторонний контракт с SRIFSE на изготовление и поставку станций ATROPATENA. В контракте оговариваются цена станции и право собственности FP.

8.2.2. AP - обладают правом получения информации о прогнозах произошедших землетрясений и имеют право доступа к информации и архивам, размещенным на Международном Сайте IGSFE.

Каждый AP ежегодно получает пароль для входа в закрытые базы архивных данных IGSFE.

AP в любое время может подать заявление в ВР для принятия его в качестве FP. Для этого, вместе с заявлением о принятии в качестве действительного участника IGSFE, необходимо представить в ВР копию контракта на полное или частичное приобретение станции ATROPATENA.

Представители AP могут участвовать в работе ВР в качестве наблюдателей без права решающего голоса.

8.3. Все правовые и финансовые взаимоотношения между FR и SRIFSE регулируются на основании двухсторонних контрактов между FR и SRIFSE.

9. Дополнительные условия

9.1. Настоящая программа IGSFE составлена на английском языке и подписана всеми участниками программы, при этом каждый участник программы имеет один экземпляр подписанного оригинала.

9.2. Участники программы IGSFE, присоединившиеся впоследствии к договору, получают оригинал решения правления программы о принятии их в качестве участников, подписанный ДП.

Глава 6

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ЦИКЛИЧНОСТЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

6.1. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В СФЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОНИТОРИНГА ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

В последние годы большое внимание уделяется проблеме глобальных климатических изменений. Специальные экспертные структуры ООН пришли к выводу, что основной причиной глобальных изменений климата в течение последних двух столетий является техногенная деятельность человека. Но только ли в этом причина глобального потепления на самом деле?

В первой половине декабря 2007 года на индонезийском острове Бали прошла очередная конференция сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). От Балийской конференции в первую очередь ждали решений по вопросам, определяющим будущее климатического процесса. Ключевыми здесь стали два пункта повестки дня: 1) о долгосрочных мерах сотрудничества по решению проблем, связанных с изменением климата и 2) о будущих обязательствах развитых стран в рамках Киотского протокола. Компромисс был найден, согласованные решения были приняты, однако будущее климатического процесса остается не вполне очевидным. Глубинные причины этой неопределенности связаны как с историей международных взаимоотношений по стабилизации климата (в частности, принятием Киотского протокола и отказом США от его ратификации), так и с изменениями в глобальной структуре антропогенных выбросов парниковых газов.

Считаем необходимым предоставить короткую справку. Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН) была принята в 1992 году в ответ на появление все большего числа научных свидетельств того, что глобальное изменение климата определяется антропогенным изменением содержания парниковых

газов атмосферы. Ряд последствий потепления, в частности, увеличение частоты экстремальных погодных явлений, таяние горных ледников, повышение уровня океана, весьма негативно сказываются на состоянии природной среды и развитии общества. Долгосрочной целью Конвенции была провозглашена стабилизация концентраций парниковых газов атмосферы на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему планеты. Ключевой формой деятельности по смягчению климатических изменений признано сокращение антропогенных выбросов парниковых газов (далее термин «меры смягчения» будет использоваться по отношению к активности, связанной с сокращениями эмиссий парниковых газов и усилением их поглощения (например, при посадке лесов). Поскольку эмиссии, в основном, связаны со сжиганием ископаемого топлива, являющимся главным источником энергии в современном мире, такая постановка долгосрочной цели РКИК ООН неминуемо должна была отразиться на развитии мировой экономической системы.

Важным элементом Конвенции стал принцип общей, но дифференцированной ответственности. Все страны были разделены на две группы: развитые (страны Европы, США, Канада, РФ, Япония, Австралия, Новая Зеландия) и развивающиеся. Полный перечень развитых стран приводится в Приложении I к РКИК ООН. Согласно Конвенции, страны Приложения I должны играть ведущую роль в борьбе с изменением климата и его негативными последствиями. Помимо ограничения национальных выбросов парниковых газов, положения РКИК ООН обязывают развитые страны предоставлять финансовые и технологические ресурсы развивающимся странам для мер смягчения, а наиболее уязвимым странам - и для адаптации к климатическим изменениям. Странам Приложения I, осуществляющим переход к рыночной экономике (в том числе и России), предоставляется определенная степень гибкости в выполнении своих обязательств.

Большинство положений РКИК ООН сформулированы в общем виде, а их детализация осуществляется решениями ежегодных Конференций сторон РКИК. Эти решения становятся юридически обязательными для всех стран-участниц РКИК. Первая конференция сторон прошла в 1995 году в Берлине, Балийская конференция стала 13-й по счету.

Киотский протокол к РКИК ООН был принят в 1997 году в целях ужесточения обязательств развитых стран. Протокол имеет ограниченный период действия (2008-2012 гг.) и предписывает каждой из стран строго определенные уровни выбросов к концу этого периода. Так, эмиссии в 2012 году должны составлять от уровня 1990 года не более 93% в США, 92% - в Европейском союзе, 100% - в России. Киотским протоколом были введены финансовые механизмы, способствующие выполнению развитыми странами своих обязательств, в частности, торговля квотами на выбросы, совместное осуществление, чистое развитие. (Суть *торговли квотами* состоит в том, что страны, не справляющиеся со своими обязательствами по сокращению выбросов, могут покупать квоты у тех стран Приложения I, которые «перевыполнили» обязательства. Проекты *совмес-*

тного осуществления проводятся между странами Приложения I, при этом страна, инвестирующая проект, получает права на сокращения выбросов, являющиеся результатом проекта. Механизм *чистого развития* используется в том случае, если страна, принимающая проект, является развивающейся). Для вступления в действие требовалась ратификация Киотского протокола странами-участницами. Ратификация Протокола развивающимися странами, не имевшими количественных обязательств по сокращению выбросов, в основном прошла успешно. В развитых странах процесс шел очень непросто. В 2001 году республиканская администрация США объявила об отказе ратифицировать Киотский протокол. Примеру США поначалу последовала и Австралия, однако сейчас позиция этой страны изменилась. Непосредственно во время Балийской конференции Австралия объявила о ратификации.

Мы ни в коей мере не ставили задачу вступления в полемику с экспертными структурами ООН относительно сделанных ими выводов. Нашей целью является попытка показать, что на фоне действительно пагубного влияния техногенной деятельности человечества на природную среду и, в частности, на глобальные климатические изменения, нельзя умалять роль эндогенных геологических процессов, которые также оказывают существенное влияние на климатические изменения в общепланетарном масштабе.

Резюмируя многолетние исследования по изучению пространственно-временных закономерностей вулканической и сейсмической активности Земли, нам трудно избавиться от впечатления, что наблюдаемые в настоящее время глобальные климатические изменения, в частности, глобальное потепление, в большей степени обязаны повышению активности магматических вулканов поясов сжатия Земли, сохраняющих эту тенденцию в течение последних 200 лет.

При написании настоящей главы нами использовались материалы, приведенные в последнем отчете (2007) Межправительственной комиссии по изменению климата (IPCC) (<http://www.ipcc.ch/>).

Так, по данным IPCC, в 2007 году концентрация CO_2 в атмосфере составляла 380 промилле. Каждый год деятельность человека увеличивает это число. Некоторые ученые-климатологи и экономисты, такие, как Дэвид Штерн и Джеймс Хансен, считают, что концентрация в 450 промилле предельно допустима, чтоб избежать вреда, который CO_2 нанесет экосистеме и экономике планеты (<http://www.ipcc.ch/>).

В XX в. на естественный ход природных процессов накладывается воздействие человека, что стало заметно в ледниковых отложениях. Повышается антропогенная концентрация атмосферных нитратов и сульфатов: за 100 лет содержание во льду анионов SO_4^{2-} выросло в три-четыре раза, а с 1950-х годов начала расти концентрация NO_3^- , к настоящему времени уже успевшая удвоиться из-за выбросов автотранспорта.

Однако главное влияние на климат, по мнению IPCC, человечество оказывает увеличением не столько выбросов аэрозолей, сколько парниковых газов: CO_2 ,

CH_4 , N_2O И фреонов. Детальные наблюдения за концентрацией CO_2 в атмосфере ведутся уже многие годы на обсерватории Мауна-Лоа (Гавайские о-ва) и на Южном полюсе. По этим данным, с начала XIX в. по 80-е годы XX в. она выросла с 285 ppт, что типично для межледниковых условий, до 335-338 ppт, чему нет аналогов в данных из скважины со станции Восток. Современная концентрация метана в атмосфере равна 1,7 ppт - в 2,5 раза больше максимума, выявленного по керну из района станции Восток (IPCC, 2007).

Если сравнить нынешние концентрации парниковых газов с определенными по ледниковому керну для доиндустриальной эпохи, оказывается, что за последние 200 лет их рост составил 25% для CO_2 , 100% для CH_4 , 8-10% для N_2O (IPCC, 2007).

Последние значения согласуются с данными о масштабах сжигания минерального топлива, а общий рост содержания парниковых газов в атмосфере - с увеличением населения Земли, которое за те же 200 лет увеличилось с 1 до 5 млрд. чел. Значит, именно рост народонаселения приближает человечество к экологической катастрофе (IPCC, 2007).

Собственно ледниково-межледниковые колебания испытывают на себе влияние быстрых обратных связей, обусловленных наличием водяного пара в атмосфере, облачностью, снежным покровом и морским льдом, а также более длительных, обязанных медленным изменениям структуры и состава атмосферы, что переносит холодные условия ледниковой эпохи в какой-то мере на межледниковье. Чтобы понять механизм этих процессов, нужно исследовать чувствительность глобального климата к изменениям концентрации парниковых газов (IPCC, 2007).

Известно, что разогрев земной поверхности под влиянием антропогенных факторов за последнее столетие составил 2 Вт/м², а в будущем, из-за ожидаемого удвоения концентрации CO_2 в атмосфере (от 300 до 600 ppт), он может достигнуть 4 Вт. Кажется, что это немного по сравнению со средним потоком поглощенной солнечной радиации, равным 240 Вт/м², но и эта величина приводит к повышению приземной температуры в среднем на 1,2°C. А с учетом упомянутых эффектов обратных связей, усиливающих такой нагрев, общее потепление может оказаться значительнее. Современные оценки дают 2,8-5,2°C (в среднем около 4°C). Это вдвое больше, чем без учета обратных связей. И именно эта величина определяет чувствительность климата к росту концентраций парниковых газов (IPCC, 2007).

Таким образом, вклад парниковых газов в изменение температуры в Центральной Антарктиде за последний климатический цикл может колебаться в пределах 40-65%, или примерно 50±10%. Это означает, что приблизительно 3° из 6°C - амплитуды ледниково-межледниковых изменений - могут быть обязаны парниковому эффекту (IPCC, 2007).

Однако грядет «парниковое» потепление, в результате чего могут растаять некоторые ледниковые покровы, и уровень океана повысится на 5-7 м всего за

десятки лет. Это будет поистине глобальная катастрофа: целые страны (например, Голландия), крупнейшие города мира - Нью-Йорк, Токио, Санкт-Петербург и др. - окажутся под водой (IPCC, 2007).

Такова цепочка рассуждений, которая протягивается от древнего ледяного керна, извлеченного с глубины более 2 км, к будущему окружающей среды, в значительной степени зависящему от разумности действий человечества (IPCC, 2007).

Мы практически дословно процитировали наиболее напрягающие положения отчета, приведенного на сайте <http://www.ipcc.ch/>, дабы исключить возможные упреки в неточности их изложения.

6.2. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Позиция IPCC хорошо известна. Теперь попробуем рассмотреть основные геологические факторы, которые также могут влиять на глобальные климатические изменения.

Рассмотрим основные геодинамические факторы, которые могут оказать существенное влияние на глобальные изменения климата.

1. *Дрейф географического полюса Земли.*
2. *Дрейф геомагнитного полюса Земли.*
3. *Изменение угловой скорости вращения Земли.*
4. *Повышение эндогенной, в частности, вулканической активности Земли.*

В 123 г. до н.э. Гиппарх открыл явление прецессии - предварение равноденствий. В 1755 г. Дж. Брайлей обнаружил другое явление - нутации оси вращения Земли. На рис. 149 показана траектория движения северного географического полюса в 1996-2000 гг.

Максимальное удаление мгновенного полюса от среднего отмечалось в 1996 г. Затем полюс стал закручиваться, и в 2000 г. подошел на минимальное расстояние к центру спирали. С 2000 по 2003 г. полюс раскручивался, а сейчас снова закручивается, постепенно перемещаясь по спирали к своему среднему положению (Сидоренков, 2004).

Самое большое удаление мгновенного полюса от среднего не превышает 15 м. Закручивание и раскручивание траектории мгновенного полюса объясняется тем, что он совершает два периодических движения: свободное, или чандлеровское (названо в честь открывшего его в 1891 г. С. Чандлера), с периодом около 14 мес., и вынужденное с годовым периодом. Чандлеровское движение возникает, когда ось вращения Земли отклоняется от оси ее наибольшего момента инерции. Вынужденное движение вызывается действием на Землю периодических сил со стороны атмосферы и гидросферы, имеющих годовую цикличность. Мы не будем

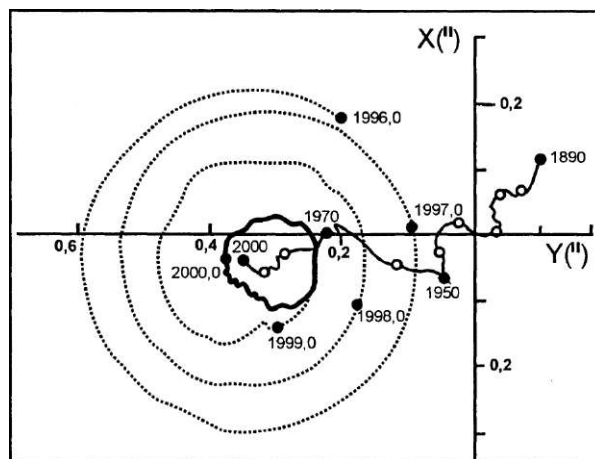


Рис. 149. Траектория движения Северного географического полюса в 1996-2000 гг.

Сплошная кривая - траектория среднего полюса с 1890 по 2000 гг. (по данным Международной службы вращения Земли, 2000)

останавливаться на причинах Чандлеровских и многих других типов движений оси Земли, прекрасно описанных в работе Н.С. Сидоренкова (2004) (см. рис.149). Между тем, очевидно, что сложные колебания оси Земли и, как следствие, ее географического полюса, оказывают влияние на глобальные климатические процессы, ведь именно «качания» земной оси вызывают сезонные изменения климата.

На рис. 150 показан график, характеризующий движение геомагнитного полюса. Как видно из графика, к концу 90-х годов скорость дрейфа геомагнитного полюса увеличилась почти в пять раз, по сравнению с 1980 годом. Этот факт может свидетельствовать о существенных изменениях в энергетических процессах в ядре Земли, формирующих геомагнитное поле нашей планеты. Безусловно,

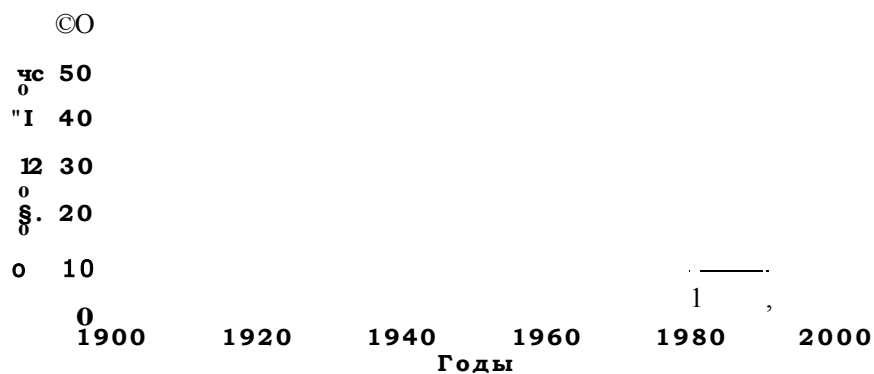


Рис. 150. Скорость движения геомагнитного полюса (Кокоуров, 2006)

этот факт может свидетельствовать о начале очередного цикла резкой активизации эндогенной активности Земли.

С другой стороны, как известно, геомагнитное поле формирует своеобразный магнитный экран, препятствующий проникновению солнечной радиации, включая заряженные частицы высоких энергий, к поверхности Земли. В то же время в области полярных шапок существуют так называемые каспы - полярные щели, в результате чего в них устремился радиационный материал солнечного ветра и межпланетного пространства, т.е. в полярные области стало попадать огромное количество дополнительного вещества и энергии, что приводит к «разогреву» полярных шапок. Естественно, изменение положения геомагнитных полюсов приводит и к смещению каспов и, как следствие, областей повышенного потока солнечной радиации на Землю. Естественно, что этот процесс должен вызвать перераспределение системы циклонов и антициклонов на нашей планете, что приводит к серьезным глобальным климатическим изменениям.

6.3. ВУЛКАНИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Между тем, как отмечалось выше, в докладе IPCC основной причиной глобальных климатических изменений называется резкое увеличение в атмосфере Земли парниковых газов. В то же время известно, что при извержениях вулканов в атмосферу Земли выбрасывается большой объем различных газов, в том числе парниковых: CO_2 , CO , SO_2 , H_2S , CS_2 , OCS , NO .

Концентрация углекислого газа колеблется от 1 до 10% от общей массы вулканических газов, 0,1-0,7% составляет CO (Gerlach, 1980).

Наиболее пагубное влияние на глобальные климатические изменения оказывают серосодержащие газы вулканических извержений. При извержениях вулканов в атмосферу выбрасывается двуокись серы SO_2 , сероводород H_2S , сероуглерод CS_2 , карбонисульфид OCS и частицы твердой серы. В работах Кейдла показано, что газ SO_2 составляет примерно 10% от всех газовых выбросов вулканов, а его ежегодные выбросы составляют 2-107 т. (Cadle, 1975). Анализ выбросов вулканических газов показал, что основным серосодержащим газом является SO_2 (2-10 Мт/год). В целом, в вулканических газах доля сернистого газа составляет от 1 до 10% (Athathurov et al., 1986).

Представляет большой интерес анализ изменений концентрации CO_2 в атмосфере Земли в геологическом прошлом и сравнение этих данных с уровнем вулканической активности. Результаты этих исследований приведены на рис. 151, который показывает, что концентрация углекислого газа в фанерозое изменялась от 0,1 до 0,4%. Вулканическую активность на графике характеризует скорость образования вулканогенных пород в течение фанерозоя. На рисунке хорошо видно,

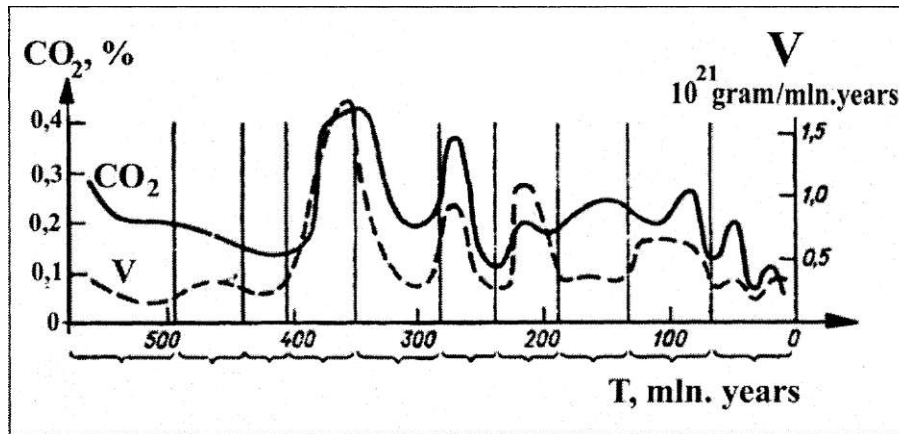


Рис. 151. Изменения количества углекислого газа в атмосфере и скорость образования вулканогенных пород в течение фанерозоя (Athaturon et al., 1986)

что в вулканической активности фанерозоя ярко выражены циклы с периодами 80-100 млн. лет.

Результаты сравнения графиков на рис. 151 показывают существование прямой зависимости концентрации CO₂ от вулканической активности. На наш взгляд, интересной и важной особенностью этой зависимости является отчетливо наблюдаемое запаздывание увеличения концентрации CO₂ по отношению к скорости образования вулканогенных пород. Это вполне логично, исходя из принципа причинно-следственной связи: сначала повышается активность вулканических извержений, а затем увеличивается концентрация CO₂ в атмосфере, и последовательность этих процессов имеет определенную задержку во времени. Чем выше масштаб рассматриваемого периода цикличности, тем длительнее время запаздывания.

Углекислый газ прозрачен для коротковолновой радиации, но он поглощает длинноволновое излучение электромагнитных волн в нескольких диапазонах. В результате этого он является существенным фактором, создающим парниковый эффект, повышающий температуру нижнего слоя воздуха атмосферы Земли.

В исследованиях связи концентрации CO₂ в атмосфере и среднегодовых изменений температуры используется логарифмическая зависимость, приведенная на рис. 152 М.И. Будыко исследовал эту зависимость по эмпирическим данным на основе изучения геологического прошлого. В работах М.И. Будыко показано наличие прямой связи между вулканическими извержениями и глобальными климатическими изменениями (Будыко, 1968-1984).

Нами приведен обзор некоторых основных работ, показывающих наличие объективной и достоверной связи между вулканической активностью и глобальными климатическими изменениями. Ограниченность объема главы не позволяет

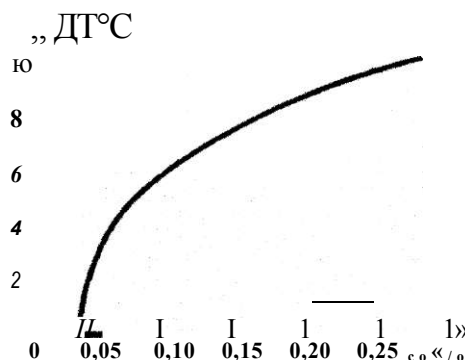


Рис. 152. Зависимость средней температуры воздуха от концентрации углекислого газа (Будыко, 1979)

привести более обширный обзор многочисленных исследований в этой области. Между тем, на наш взгляд, даже упомянутые работы представляют достаточно убедительные доказательства связи вулканизма с климатом Земли.

64. ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗЫ

Для выяснения степени возможного влияния цикличности в извержениях вулканов на глобальное потепление климата нами были сопоставлены графики среднего изменения температур на Земле и среднего числа извержений магматических вулканов поясов сжатия Земли с 1850 по 2000 годы (рис. 153).

Как отмечалось в предыдущих разделах, около 90% доли энергии и выбросов в атмосферу высвобождается при извержениях магматических вулканов типа С.

Сравнение графиков показало высокое сходство характеров изменений во времени как среднегодовой температуры, так и вулканической активности. Оба графика можно условно разделить на три этапа: 1853-1915 гг.; 1916-1965 гг.; 1966-2000 гг. Каждый этап характеризуется резким повышением как температуры, так и вулканической активности - в 1915 и в 1965 годах. Примечательно, что на первом этапе на обоих графиках выделяется три цикла активизации, на втором этапе - два цикла, на третьем этапе также два неполных цикла.

Наиболее интересным фактом является запаздывание циклов повышения температуры по отношению к циклам увеличения вулканической активности. В основе этого запаздывания лежит причинно-следственная связь между этими двумя процессами. Эта же особенность нами была отмечена и при сравнении графиков вулканической активности и концентрации CO_2 в атмосфере Земли в течение фанерозоя (см. рис. 151).

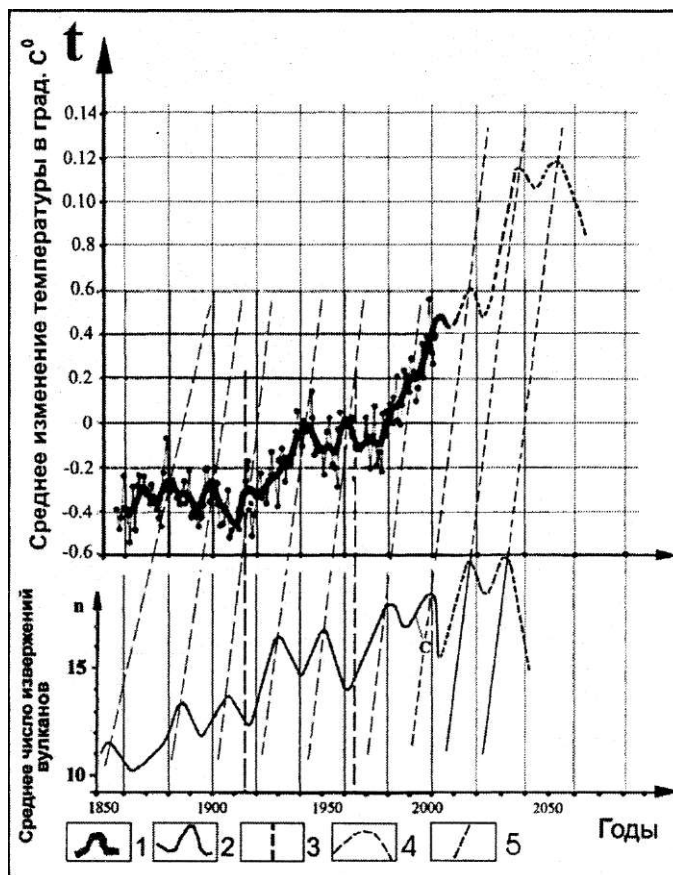


Рис. 153. Сравнение графиков среднего изменения температур на Земле и среднего числа извержений магматических вулканов поясов сжатия Земли с 1850 по 2000 годы (Хаин, Халилов, 2008)

1 - график изменений температуры на Земле в $^{\circ}\text{C}$ (прогнозная часть графика дополнена В.Е. Хаиным и Э.Н. Халиловым, 2008 г.) (http://www.seed.slb.com/ru/scictr/watch/climate_change/index.htm); 2 - график вулканической активности; 3 - прямые, ограничивающие двоянные циклы вулканической активности и изменений температур; 4 - прогнозные части графиков среднего изменения температур и вулканической активности; 5 - прямые, соединяющие экстремальные точки циклов вулканической активности и вариаций среднегодовых температур

Рассмотрим механизм причинно-следственной связи вулканической активности и изменения температуры на Земле. Повышение числа извержений вулканов приводит к увеличению поступления в атмосферу вулканических газов, способствующих усилению парникового эффекта и, как следствие, приводящих к повышению температуры атмосферы. С 1860 года по 2000 год число извержений вулканов увеличилось на 80%.

Судя по графикам рис. 153, увеличение числа извержений вулканов в среднем на 5 в год соответствует увеличению температуры на $0,4^{\circ}\text{C}$. Высокое сходство графиков глобальных изменений температуры на нашей планете и вулканической активности Земли имеет логическое обоснование с точки зрения физических аспектов. Увеличение практически вдвое среднегодового числа извержений вулканов должно привести к увеличению вдвое поступающих в атмосферу газов при извержениях вулканов и, прежде всего CO_2 , которому отводится ведущая роль в формировании парникового эффекта и повышении среднегодовой температуры на Земле.

На основе установленных корреляционных особенностей и использования выдвигаемого нами принципа причинно-следственной связи различных природных процессов, сделана попытка долгосрочного прогноза как изменения вулканической активности поясов сжатия Земли, так и глобального изменения средней температуры на нашей планете до 2060 года (см. рис. 153).

При построении прогнозной части графика нами был учтен период запаздывания максимумов среднего повышения температуры Земли по отношению к максимумам вулканической активности, а также соотношения амплитуд циклов повышения средней температуры Земли по отношению к циклам повышенной вулканической активности.

На рис. 154 показаны тренды изменения содержания CO_2 , CH_4 и роста населения Земли с 1800 г. по 2000 г. На рис. 155 приведен тренд вулканической активности, отражающий общий характер увеличения числа извержений вулканов с 1850 г. по 2000 г. Сравнение этих графиков показывает их высокое сходство.

На наш взгляд, сравнение роста содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере и вулканической активности Земли может являться косвенным свидетельством существования определенной связи между этими процессами.

Хотелось бы остановиться еще на одном важном аспекте, который, по нашему мнению, может оказывать существенное влияние на глобальные климатические изменения. Речь идет об ускорении смещений магнитных полюсов. Дело в том, что вместе с магнитными полюсами происходит смещение и каспов (полярных щелей в магнитосфере на севере и юге), а это, в свою очередь, приводит к перераспределению падающих на Землю корпускулярных и волновых потоков энергии. Следует также учесть и факт возрастания угла раствора каспов, который к середине 90-х годов достиг 45° , что также способствует усилению потока солнечной энергии, проникающей к поверхности Земли. Указанные факторы изменяют сложившийся баланс атмосферных циркуляций.

Этот фактор, к сожалению, не учитывается климатологами при оценках возможных глобальных климатических изменений в будущем.

Проводимые нами исследования свидетельствуют о том, что эндогенные процессы на нашей планете существенно активизировались в последние два столетия, при этом наибольшее ускорение этих процессов наблюдается в последние три десятилетия. Об этом свидетельствует характер изменений сейсмической и

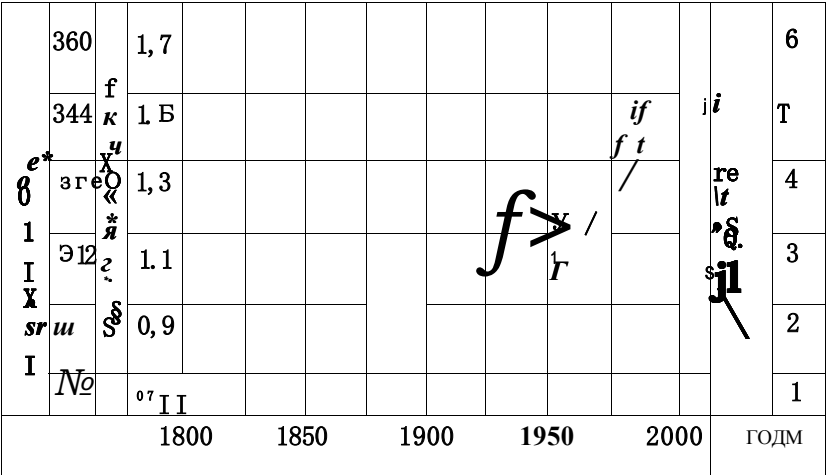


Рис. 154. Изменение содержания CO₂ и CH₄ в атмосфере, а также роста населения на Земле с 1800 по 2000 гг. (<http://www.ipcc.ch/>)

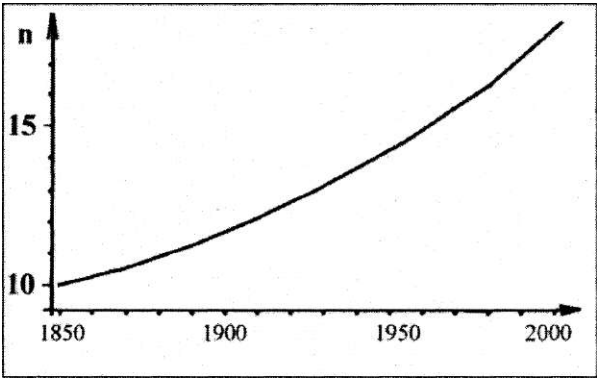


Рис. 155. Тренд вулканической активности

вулканической активности, скорости движения геомагнитных полюсов, глобальных изменений температуры атмосферы Земли и содержания в ней эндогенных газов, изменения уровня Мирового океана и т.д.

6.5. ВЫВОДЫ

- Роль вулканической активности Земли в глобальных климатических изменениях существенно выше, чем принято считать.
- Основной причиной глобальных изменений температуры является увеличение числа и мощности извержений вулканов в периоды максимальных значений

циклов вулканической активности. Это приводит к увеличению поступления в атмосферу парниковых газов вулканического происхождения. Так, с 1850 г. по настоящее время индекс вулканической активности увеличился на 80-85%. Следовательно, логично считать, что и объем вулканических газов, выбрасываемых при извержениях вулканов, также увеличился за этот период на 80-85%.

- Глобальное повышение среднегодовой температуры на Земле, на фоне незначительных вариаций, по нашему мнению, будет наблюдаться до 2050 года. За этот период среднегодовая температура повысится за счет вулканической активности примерно на $0,7-0,8^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 153).

- Признание значительной роли вулканической активности в глобальном потеплении Земли позволит более объективно подойти к оценке реальных последствий глобальных климатических изменений. Мы хотим отметить, что периоды повышения вулканической активности сменяются периодами ее понижения. По нашему мнению, с 2030-2035 гг. начнется снижение вулканической активности Земли, что приведет к снижению среднегодовой температуры начиная с 2050 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа высветила совершенно новые аспекты исследования цикличности в геодинамических процессах, прежде всего в преломлении через призму восприятия Земли как одного из элементов многофункциональной системы Космоса.

ЦИКЛИЧНОСТЬ - основополагающая закономерность подавляющего большинства проявлений природных процессов, от микро- до макромира, и нами сделана попытка показать это на конкретных фактах и примерах.

Каким образом Земля взаимодействует с другими элементами космического пространства и какова роль этих взаимодействий в развитии Земли и отдельных ее сфер - магнитосферы, атмосферы, гидросферы и тектоносферы? Мы попытались рассмотреть основные факторы космо-земных связей и, прежде всего, речь идет о Солнечной системе. Особая роль отводится изучению и оценке степени влияния на геодинамические процессы солнечной активности, планет солнечной системы, в частности, Луны, Марса, Венеры, положения Земли на своей орбите и т.д. Приведены расчеты гравитационного влияния Марса и Луны на атмосферные и геодинамические процессы, предложены определенные механизмы этого влияния. В книге большая роль в формировании цикличности природных процессов отведена гравитационному фактору, в частности, влиянию на геодинамику и геометрические параметры Земли сверхдлинных гравитационных волн космического происхождения.

Гравитации принадлежит основополагающая роль в развитии Вселенной и космоса, формировании взаимодействия и движения всех элементов космического пространства: галактик, звездных систем, черных дыр, звезд, планет и других космических объектов и образований.

Гравитация, с одной стороны, является одним из самых глубоко изучаемых, а с другой - одним из наименее изученных и таинственных проявлений природы. Открытие в последние годы «скрытой массы» или «темной материи», природа которой до сих пор остается невыясненной, является ярким тому подтверждением.

Помимо гравитации и ее проявлений, в настоящей книге большое внимание уделяется и другим факторам, формирующим цикличность геологических процессов разных масштабов.

Мы попытались также показать, что, казавшаяся чисто астрофизической, проблема гравитационных волн на самом деле входит в круг интересов также геофизики и геологии и, прежде всего - геодинамики, изучающей динамику геологических и геофизических процессов.

Как влияют на геодинамические процессы проходящие через Землю гравитационные волны, обладающие различной амплитудой и длиной, каким образом они отражаются на деформации формы Земли, движении литосферных плит, проявлении внутренней энергетики планеты, отражающейся в виде изменений сейсмической и вулканической активностей?

С помощью технических средств астрофизикам пока что не удалось зафиксировать гравитационные волны. Но Земля сама является сложной энергофункциональной системой, чутко реагирующей на любые внешние воздействия. Авторы сделали попытку рассмотреть в качестве детектора гравитационных волн саму Землю, точнее, реакцию геодинамических процессов на прохождение гравитационных волн.

Происхождение и развитие Земли

В последние десятилетия в решении проблемы происхождения Солнечной системы и нашей Земли как ее составного элемента достигнуты весьма существенные успехи. Тем не менее, некоторые ее стороны, в том числе достаточно важные, вызывают различные толкования.

В каком состоянии вышла новорожденная Земля из стадии своей аккреции? Была ли она холодной или горячей, однородной или неоднородной, т.е. сгустком тел различного состава и размера, или закономерно расслоенной по вертикали? Решение именно этих вопросов имеет наибольшее значение для всех исследователей Земли.

Рассматривая основные аспекты происхождения Солнечной системы, можно констатировать, что к настоящему времени подавляющее большинство российских (Витязев и др., 1990, 1996) и зарубежных (Russell, 2007) исследователей практически пришли к консенсусу относительно наиболее вероятного сценария ее формирования. Этот сценарий включает три стадии.

1. Возникновение 4568-4570 млн. лет тому назад новой звезды - Солнца и вокруг него газопылевого диска, как это обнаружено телескопом Спитцер вокруг некоторых молодых звезд. Материалы газопылевого диска включали и продукты взрыва Сверхновой в виде тяжелых радионуклеидов. Этот взрыв и послужил вероятным импульсом к формированию Солнца и газопылевого диска вокруг него. Данная стадия могла быть очень скоротечной - всего несколько сотен тысяч лет.

2. Материал газопылевого диска начал конденсироваться под действием гравитации с образованием планетезималей километровой, вплоть до сотен километров, размера. Именно из них потом стали формироваться планеты, их остаток

составляют астероиды, образующие пояс между Марсом и Юпитером. Данная стадия могла длиться несколько миллионов лет.

3. Гравитационная аккреция планетезималей дала начало образованию планет. Планеты земной группы возникли во внутренней части протопланетного диска, где температура превышала 0° , а остальные, состоящие в основном из льда - во внешней части диска, где температура ниже. Стадия аккреции длилась несколько десятков (до 100) миллионов лет. Через 50-70 млн. лет после ее начала в результате грандиозного импакта произошел выброс материала, из которого возникла Луна.

Развитие верхних оболочек Земли шло на доплитно-тектонической стадии от магматического океана через метеоритные кратеры, горячие точки, континентальные рифты, а на плитно-тектонической - от эмбриональной мультиплитной тектоники позднего архея, через тектонику малых плит раннего протерозоя к полномасштабной тектонике плит позднего протерозоя-фанерозоя.

Итак, зародившись в архее, тектоника плит эволюционировала на протяжении раннего и среднего протерозоя, пока уже в начале или даже к началу позднего протерозоя не приобрела свой современный стиль проявления.

Проявления цикличности в развитии Земли

Проявления цикличности являются основополагающей закономерностью в развитии природы от микро- до макромира. В развитии Земли цикличность проявляется практически во всех процессах, и ее масштабы варьируют от сотен миллионов лет до часов (собственные колебания Земли, в среднем, имеют период 54 минуты).

Так, хронология покровных оледенений в истории Земли имеет явно выраженный циклический характер.

Самое древнее оледенение, установление в Южной Африке (Каапваальский эократон), датировано в 2,9 млрд. лет (Young et al., 1998). Перигляциальные образования несколько более молодого, но также позднеархейского возраста - 2,53 млрд. лет, обнаружены в Танзанийском эократоне на Востоке Центральной Африки.

Раннепротерозойский ледниковый период, согласно сводке Дж. Кроуэлла (Crowell, 1999), имеет возраст в интервале 2,4-2,2 млрд. лет; его наиболее достоверные следы по-прежнему относятся к Канадскому щиту. Имеются указания на проявление оледенений в конце среднего протерозоя с возрастом 1,1-1,0 млрд. лет на том же Канадском щите и в Западной, а, возможно, и Центральной Африке, но они считаются мало достоверными (Evans, 2000).

В позднем протерозое покровные оледенения получили наиболее мощное развитие, возможно, за всю историю Земли. Их следы установлены на всех континентах, причем наиболее четко фиксируются два интервала - позднерифей-

ский, 740-720 млн. лет т.н. (все континенты), и ранневендский, 620-600 млн. лет т.н. (большинство континентов). Первый период известен в Австралии под названием стертского (Sturtian), в Северной Америке - рапитанского (Rapitan), второй в Европе давно известен как варангерский, или лапландский, а в Австралии как меринийский (Marinoan). Но в литературе имеются указания о несколько более поздних ледниковых эпохах: 580-570 млн. лет т.н. (поздний венд, Авалония-Кадомия) и 454 млн. лет т.н. (граница венда-кембрия, Лаврентия, Западная Африка, Южная Америка).

Палеозойские оледенения, согласно сводке Дж. Кроуэлла, датируются таким образом:

445-429 млн. лет, поздний ордовик - ранний силур;

363-353 млн. лет, поздний девон - ранний карбон;

338-256 млн. лет, поздний палеозой.

Начало позднекайнозойского оледенения Антарктиды определено не позднее 38 млн. лет т.н., а Арктики - 2,7 млн. лет т.н.

Цикличность ярко проявляется и в геотектонической активности. Так, поднятия горных сооружений происходят явно неравномерно, временами заметно усиливаясь, что находит отражение в темпах эрозии и седиментации. Так, для Гималаев отмечены фазы усиления эрозии (более 1 мм/год) на рубежах 22,20, 18, 15, 12 и 5 млн. лет т.н. По данным R Copeland и других, опубликованным в 1993 году, две фазы были наиболее значимыми - от 10,9 до 7,5 и после 0,9 млн. лет т.н. (минералогические исследования осадков Бенгальского конуса выноса).

В истории Земли Н.А. Божко выделяет 11 суперконтинентальных циклов, начиная с 4190 млн. лет т.н., но оговаривается, что в известной геологической летописи могут быть установлены лишь 8 из них, с кульминациями на рубежах 3005, 2610, 2215, 1800, 1415, 1020, 625 и 230 млн. лет т.н. (легко видеть, что почти все эти рубежи совпадают с признаваемыми и другими исследователями).

Землетрясения, цунами, крупные оползни и обвалы, вулканические извержения, особенно крупные, ураганы - все это, несомненно, геологические катастрофы. Они уносят жизни тысяч, нередко десятков тысяч людей, и не удивительно, что их прогнозированию и возможному смягчению последствий посвящена специальная международная программа.

Крупнейшей катастрофой в новейшей истории Земли, очевидно, была та, что описана в «Ветхом завете» под названием Всемирного потопы. Долгое время, вплоть до работ английских геологов У. Бекленда и А. Седжвика 20-х годов XIX века, это событие воспринималось как реальное, и вся история Земли делилась на две эры - до и после Всемирного потопы. Однако в дальнейшем взгляды «дильювианистов», как их называют (от лат. diluvio - потоп), были отвергнуты и даже осмеяны. Теперь же выясняется, что в ветхозаветном предании содержалась значительная доля истины. Недавно австрийские ученые из Венского Университета Эдит Кристан-Толман и Александр Толман опубликовали серьезное исследование (Cristian-Tollman, Tollman, 1991), в котором на основании анализа различных

источников была установлена даже точная дата события - 23 сентября 9545 г. до н.э., т.е. в начале голоцена.

Само событие, трактуемое как столкновение с Землей кометы, основные обломки которой упали в океан, породило землетрясение небывалой силы, мощные извержения вулканов, огромные волны цунами, ураганы и ливни глобального масштаба, резкое повышение температуры, лесные пожары, общее затемнение, затем похолодание (типа «ядерной зимы»). Вследствие «потопа» исчез ряд представителей существовавшей тогда наземной фауны, в том числе мамонты, а первобытные люди уцелели лишь в пещерах. Одним из свидетельств этого события является выпадение дождя из стеклянных шариков-тектитов на огромном пространстве, охватывающем Азию, Австралию, Южную Индию, Мадагаскар. Возраст тектитосодержащих слоев во Вьетнаме - около 10 тыс. лет (Изох, 1991) - совпадает с датировкой «потопа», установленной супругами Тольман по другим данным: по годичным кольцам деревьев, по резкому увеличению содержания кислот в ледниковом покрове Гренландии, по времени исчезновения мамонтов в Сибири.

Имеются все основания предполагать, что подобные катастрофы, вызванные столкновениями с кометами (вспомним еще Тунгусское событие) или падение крупных метеоритов (астероидов), неоднократно повторялись в более ранние геологические эпохи и были причиной «великих вымираний» фауны и флоры. К списку природных катастроф чисто земного происхождения надо добавить катастрофы, связанные с взаимодействием Земля-Космос.

Итак, данные о современных геологических процессах, как эндогенных, так и экзогенных, показывают, что они протекают непрерывно-прерывисто, что их медленное и постепенное течение прерывается резкими ускорениями, эффект которых за короткие интервалы времени намного превосходит эффект медленных изменений в разделяющие эти ускорения гораздо более длительные отрезки времени.

На протяжении всех почти 4,6 млрд. лет своей истории наша планета и происходившие в ее недрах и на поверхности геологические процессы, несомненно, испытывали значительные изменения. В их основе лежало изменение физических и астрономических параметров, определяющих течение геологических процессов. Из астрономических параметров наиболее значение имело удаление Луны от Земли с уменьшением амплитуды твердых приливов, замедление осевого вращения Земли с соответственным увеличением продолжительности суток и наклона оси вращения, а также увеличение светимости Солнца и, следовательно, инсоляции земной поверхности.

Однако роль изменений, связанных с недрами планеты, была неизмеримо выше. Здесь на первое место выходит уменьшение глубинного теплового потока, оцениваемое по сравнению с археем в 3-4 раза. Это вековое охлаждение Земли связано с истощением основных источников ее разогрева — тепла, во-первых, приобретенного Землей в ходе аккреции; во-вторых, выделявшегося при образо-

вании ядра и продолжавшего выделяться в процессе дифференциации на оболочки, включая формирование внутреннего ядра за счет кристаллизации вещества внешнего ядра; в-третьих, производимое твердыми лунно-солнечными приливами, и, наконец, в-четвертых, продуцируемого распадом естественно-радиоактивных элементов и изотопов. Одновременно с выделением тепла из глубоких недр Земли происходит их дегазация, точнее, дефлюидизация, масштабы которой, несомненно, также уменьшались в истории Земли, судя, в частности, по степени развития процессов гранито- и пегматитообразования, а равно метаморфизма и метасоматизма, наиболее интенсивно проявившихся в раннем докембрии.

В противоположность деградации эндогенной энергии Земли возрастала роль энергии, производимой в ходе развития биосферы. Наблюдалось увеличение как общего объема биомассы на поверхности Земли, так и ее энергетического потенциала, а также проникновения жизни в глубины океанов, в недра Земли и в верхние слои атмосферы. Благодаря субдукции, происходящей на Земле уже 3,5 млрд. лет, если не более, продукты жизнедеятельности организмов, и прежде всего органический углерод, могли затягиваться вглубь мантии Земли, по меньшей мере до границы между верхней и нижней мантией (670 км), а, возможно, и вплоть до границы ядра, и затем участвовать в обратном подъеме (адвекции) флюидов с этих глубин. Кульминация воздействия живой материи на геологические процессы - это, конечно, геологическая деятельность человека, расширившего диапазон своего проникновения в глубины твердых недр и океана до 11-12 км и в космос до дальних пределов Солнечной системы.

Благодаря неоднократному изменению числа и расположения литосферных плит и их границ, а также характера взаимодействия между ними и соответствующему изменению полей напряжения, структурный план земной коры и литосферы непрерывно усложнялся, и возникала дисгармония между структурами разных уровней, с проявлением горизонтальных срывов между отдельными слоями литосферы.

К числу важнейших сторон эволюции Земли относится, несомненно, изменение в динамике тектоносферы (литосфера+астеносфера) и в определяющем ее конвективном режиме мантии.

Но периодическое становление и распад Пангей, а также изменение режима конвекции показывают, что на эту общую направленность развития Земли накладывается определенная цикличность. Эта крупная цикличность - мегацикличность, имеет период порядка 400-500 млн. лет. Поскольку распад Пангеи означает одновременно раскрытие вторичных океанов - Атлантического, Индийского, Арктического, Средиземного и их предшественников, а возрождение единого материка - закрытие этих океанов и соответственно расширение первичного океана с его превращением в Панталассу, эти мегациклы можно было отождествить с циклами, названными в честь канадского геофизика Дж.Т. Вилсона, впервые их установившего на примере повторного закрытия и раскрытия Атлантики (Хаин, 1992).

Причиной относительной недолговечности и неминуемого распада суперконтинентов служит, по мнению многих исследователей, начиная, по-видимому, с Д. Андерсона (Anderson, 1982), накопление мантийного тепла под их толстой и протяженной корой и литосферой. Оно порождает сначала поднятие поверхности суперконтинента, затем его раскалывание континентальными рифтами, сопровождаемое активностью плюмов и излияниями платобазальтов, далее переход рифтинга в спрединг с образованием «малых» океанских бассейнов красноморского типа, а позже и настоящих океанов атлантического типа. Расчленение суперконтинента многочисленными осями спрединга означает возврат к многоячейковой структуре мантийной конвекции и усиление выделения мантийного тепла, с охлаждением мантии в области бывшего суперконтинента. Соответственно, тепловой поток в океанском полушарии Земли начинает доминировать, что в конечном итоге приводит к повторению цикла Вилсона.

Мегацикличность лежит в основе наиболее долгопериодических колебаний уровня Мирового океана и глобального климата. В частности, с ней согласуется распределение во времени ледниковых периодов. Мегацикличность определяет вообще и крупномасштабные изменения климата на Земле, поскольку вызывает усиление (в эпохи существования суперконтинента и низких уровней океана) циркуляции в Мировом океане или ее ослабление (в эпохи распада суперконтинента и высокого уровня океана).

Наряду с мегацикличностью, в истории Земли происходили периодические изменения и многих более высоких порядков. Следующую по масштабу цикличность, порядка 150-200 млн. лет, В.Е.Хаин назвал в честь ее первооткрывателя, французского геолога М. Бертрана (Хаин, 1992). Он установил ее в конце XIX в. по повторяемости в разрезе разновозрастных складчатых систем Западной Европы и Северной Америки одной и той же последовательности осадочных формаций: сланцевой, флишевой, молассовой. Он выделил четыре цикла - гуронский, каледонский, герцинский, альпийский. Из них в литературе фигурируют три последних, дополненные, правда, еще одним циклом - киммерийским, проявившемся в мезозое; гуронский же цикл Н.С. Шатский заменил байкальским (ассинтским Г.Штилле).

Циклы Бертрана находят свое подтверждение в трансгрессивно-регрессивной цикличности, в периодических изменениях интенсивности островодужного вулканизма, гранитообразования и регионального метаморфизма, выявленных на полуколичественной основе В.Е. Хаиным и К.Б. Сеславинским (Хаин, Сеславинский, 1991).

Циклы Бертрана, в свою очередь, слагаются из серии циклов меньшей длительности. Их кульминации отмечены орогеническими фазами, когда происходило усиление складчато-надвиговых деформаций. Эти циклы опять-таки совпадали с периодичностью изменения интенсивности тектонических деформаций, островодужного вулканизма, гранитообразования и регионального метаморфизма, установленной К.Б. Сеславинским и В.Е. Хаиным. Они отвечают также циклам

второго порядка колебаний уровня Мирового океана на известной кривой П. Вэйла (Vail et al., 1977).

Длительность этих циклов, которые было предложено назвать циклами Штилле, определена в 30 млн. лет. Таким образом, цикл Бертрана должен включать четыре цикла Штилле. Эта периодичность близка к той, которая устанавливается для великих вымираний и обновлений фауны, в свою очередь, связанных, с одной стороны, с крупными трансгрессиями и регрессиями, а с другой - с усилениями бомбардировки Земли крупными метеоритами и (или) кометами.

Цикличность следующего порядка - 3-5 млн. лет - наиболее ярко выражена в ярусности глобальной стратиграфической шкалы фанерозоя и, несомненно, была неосознанной эмпирической основой при разработке этой шкалы. На уже упоминавшейся кривой Вэйла эвстатических колебаний уровня океана данной цикличности соответствуют циклы третьего порядка.

Далее идет уровень периодичности, установленный М. Миланковичем и успешно использованный им для объяснения чередования ледниковых и межледниковых эпох. По современным данным (Berger et al., 1989), это циклы длительностью 400 и 100 тыс. лет для изменений эксцентриситета земной орбиты, 41 тыс. лет - для изменений наклона оси вращения Земли, 23 и 19 тыс. лет - для прецессий. Отражение этой цикличности наблюдается также в изменениях литологии и мощности внеледниковых отложений, в частности, в изменениях содержания карбоната кальция и органического углерода. Было даже предложено считать цикл в 20 тыс. лет климатостратиграфической единицей изменений и называть ее гилбертом (Dercourt et al., 1986).

Еще более короткопериодическая цикличность была названа СЛ. Афанасьевым наноцикличностью. Он посвятил изучению цикличности геологических процессов многие годы своей деятельности. СЛ. Афанасьев различает циклы следующей длительности: 452, 109, 88, 31, 9 лет, и приводит данные, подтверждающие существование этой цикличности. Эти данные включают климатические колебания, изменения продолжительности суток, т.е. скорости вращения Земли, сейсмической активности, солнечной активности, колебаний уровней океана и озер, мощности озерных отложений и др. Добавим к этому, что исследования авторов настоящей монографии и ряда других ученых в течение последних десятилетий обнаружили также определенную периодичность вулканических извержений, наземных и подводных. СЛ. Афанасьев полагает, что в основе наноцикличности лежат воздействия Луны и Солнца, периодичность затмений и прохождения Землей перигелия. Другие исследователи (В.Е. Хаин, Ш.Ф. Мехтиев, Э.Н. Халилов, Т.А. Исмаил-Заде и др.) указывают на существование корреляции циклов вулканической и сейсмической активностей с 11- и 22-летними циклами солнечной активности.

Учет монотонной и периодической компонент геологического развития Земли имеет существенное методологическое значение. Необходима определенная осторожность в использовании столь важного практически для всех отраслей

геологии метода актуализма. Во-первых, чем дальше в геологическом времени отстоят изучаемые нами объекты и процессы от современной эпохи, тем вероятнее их отличия от современных аналогов. Правда, эти изменения геологических процессов протекали настолько медленно, что для последнего миллиарда лет их можно практически игнорировать, но для более раннего времени, и особенно начиная с границы протерозой-архей, их уже нельзя не принимать во внимание.

Во-вторых, следует непременно учитывать, а это касается фанерозоя, цикличность изменений геологической среды и протекающих в ней процессов. В частности, очень важно помнить, что мы живем в эпоху значительных климатических контрастов, в ледниковом периоде, хотя и во время межледниковья. Поэтому мы не можем проводить полную аналогию между современными процессами и процессами, протекавшими в эпохи, когда климатическая зональность на Земле была менее резко выраженной, ледниковые шапки отсутствовали, циркуляция в океанах была не столь интенсивной, и вообще обмен между океаном и атмосферой протекал существенно по-иному (Nance et al., 1988).

Цикличность современных проявлений вулканизма и сейсмичности

Высокочувствительным индикатором повышения тектонической активности являются землетрясения и извержения вулканов. В начале 1950-х годов было замечено, что суммарная энергия упругой деформации, высвободившаяся за один год в форме сейсмических волн на всем земном шаре, варьирует в широких пределах - в 40-50 раз (Gutenberg, Richter, 1954). При этом периоды повышения сейсмической активности сменяются периодами ее спада. Так, известный сейсмолог Х. Беньофф пришел к выводу, что сильные неглубокие землетрясения, происходящие в разных частях Земли, не являются независимыми событиями. Они связаны, по его мнению, с общепланетарной системой то ослабляющихся, то усиливающихся упругих напряжений.

Б. Гутенберг на основе исследований суммарной энергии глубоких землетрясений, происходящих на глубине от 70 до 700 км, пришел к выводу, что сильные глубокие землетрясения относятся к единой системе напряжений, в которой деформации упругого крипа при сжатии накапливаются или высвобождаются.

При изучении цикличности в проявлениях современного вулканизма все вулканы и землетрясения нами были разделены на четыре геодинамических типа: поясов сжатия Земли (тип С); океанские рифтовые (тип ОР); континентальные рифтовые (тип КР); океанские внутриплитные (тип ОВ). Грязевые вулканы были выделены в самостоятельный тип (тип Гр). При исследованиях общепланетарных процессов растяжения литосферы типы ОР и КР были объединены в единый тип - поясов растяжения Земли (тип Р).

Необходимо отметить, что в процессе проведенного нами детального анализа высокочастотных составляющих спектров временных рядов извержений вулка-

нов и землетрясений, вычисленных также при различных длинах фильтра, выяснилось следующее:

1. Выявленные высокочастотные гармоники (с $T < 20$ лет) сохраняются менее устойчиво при изменениях длин фильтра по сравнению с выявленными и описанными в книге низкочастотными гармониками (с $T > 20$ лет).

2. Наиболее устойчивыми высокочастотными составляющими спектров являются гармоники с $T=22-24$ года и $T=10-12$ лет.

3. При изучении спектров распределения извержений вулканов во времени установлено:

а) Высокочастотные составляющие извержений вулканов типов С, Р и Гр сходны между собой, а также со спектром чисел Вольфа, при этом периоды гармоник в различных спектрах отличаются в среднем не более, чем на 1 год.

б) Однозначно на всех спектрах извержений вулканов и чисел Вольфа выделена гармоника с $T=22$ года.

5. Изучение спектров распределения числа землетрясений во времени показало следующее:

а) В спектрах сильных (с $M > 7$) и слабых (с $M < 7$) землетрясений однозначно выделяются лишь гармоники с $T=20-23$ года.

б) В спектрах землетрясений с $M > 7$ и чисел Вольфа также выявлены сходные гармоники с $T=10-11$ лет и с $T \sim 8$ лет.

в) Спектральный анализ временных рядов слабых землетрясений показал, что наиболее близким характером спектров обладают землетрясения типов «КР» и «ОВ». Эти результаты согласуются с выявленными закономерностями в извержениях вулканов, особенно в низкочастотных составляющих спектров (с $T > 20$ лет).

г) Спектры временных рядов слабых землетрясений содержат гармоники с периодами, характерными для спектра солнечной активности: $T=22-24$ года, $T=12-14$ лет, $T=10-12$ лет, $T \sim 5$ лет.

Проведенные исследования позволяют нам достаточно уверенно говорить о влиянии 11-летних и 22-летних циклов солнечной активности на проявления современной тектонической активности Земли, отражением которой являются извержения вулканов и землетрясения.

Влияние солнечной активности на сейсмическую и вулканическую активность, дрейф геомагнитных полюсов

В монографии, на основе различных корреляционных методов исследований, показана возможность влияния солнечной активности на геодинамические процессы, в частности, на вулканическую и сейсмическую активности. Примечательно, что, если в периоды повышенной солнечной активности усиливается активность вулканов и землетрясений поясов сжатия Земли (в зонах субдукции

и коллизии литосферных плит), то в областях растяжения Земли (в рифтовых зонах) сейсмическая и вулканическая активности понижаются до минимума. Этот факт свидетельствует о неоднозначности влияния солнечной активности на геодинамические процессы и также подтверждает возможность периодического изменения радиуса Земли.

Наиболее точную модель зарождения солнечных пятен разработала в 2004 году группа ученых, работающая под руководством доктора Маусуми Дикпати из Национального Центра атмосферных исследований США (NCAR).

Исследователи в начале 2006 года рассчитали 24-й цикл солнечной активности, пик которого придется на 2012 год. Прогнозируется, что 24-й цикл солнечной активности будет в 1,5 раза выше предыдущего 23-го.

Между тем, нами показано, что в 2012 году ожидается не только пик 24-го, особенно мощного, 11-летнего цикла солнечной активности, но и пик четвертого 75-85-летнего цикла. Этот цикл показан в виде огибающей максимумов 11-летних циклов солнечной активности. На этот период приходится также максимум еще одного, более крупного, предположительно, 300-летнего цикла солнечной активности.

Таким образом, максимум цикла повышенной солнечной активности приходится на 2012 год. Между тем, максимумы циклов вулканической и сейсмической активности поясов сжатия Земли приходятся на 2012-2015 годы, учитывая наблюдаемое ранее запаздывание во времени 11-летних циклов вулканической и сейсмической активности, по отношению к таковым солнечной активности. Более длительный период максимальных значений активности вулканизма и сейсмичности (4 года), по сравнению с солнечной активностью, объясняется, с одной стороны достаточной инертностью геодинамических процессов, а с другой - влиянием, помимо солнечной активности, целого ряда других факторов как эндогенного, так и космического характера. Авторами впервые приведен долгосрочный прогноз вулканической и сейсмической активности поясов сжатия Земли до 2020 года.

Магнитное поле Земли является неотъемлемой физической характеристикой нашей планеты, отражающей сложные энергетические процессы во внутреннем и внешнем ядре. Считается, что основной причиной образования магнитного поля Земли является течение огромных масс жидкого железа, составляющих внешнее ядро Земли, вокруг внутреннего твердого ядра Земли.

Роль геомагнитного поля для существования и развития жизни на Земле трудно переоценить, ибо силовые линии магнитного поля Земли создают вокруг планеты своеобразный магнитный экран, защищающий поверхность Земли от губительных для всего живого космических лучей и потока заряженных частиц высоких энергий.

Смещение магнитных полюсов регистрируется с 1885 г. За последние 100 лет магнитный полюс в южном полушарии переместился почти на 900 км и вышел в Индийский океан. Новейшие данные по состоянию арктического магнитного по-

люса (движущегося по направлению к Восточно-Сибирской мировой магнитной аномалии через Ледовитый океан) показали, что с 1973 по 1984 годы северный геомагнитный полюс сместился на 120 км, с 1984 по 1994 г. - более чем на 150 км. На начало 2002 года скорость дрейфа северного магнитного полюса увеличилась с 10 км/год в 70-х годах, до 40 км/год в 2001 году.

Следует учесть и факт возрастания угла раствора каспов (полярных щелей в магнитосфере на севере и юге), который к середине 90-х годов достиг 45° . В расширившиеся щели устремился радиационный материал солнечного ветра и межпланетного пространства, т.е. в полярные области стало попадать огромное количество дополнительного вещества и энергии, что приводит к «разогреву» полярных шапок.

В прошлом инверсии магнитных полюсов уже происходили не раз, и жизнь сохранилась. Весь вопрос в том, какие формы жизни могут сохраниться и каким мутациям они подвергнутся? Если, как утверждается в некоторых гипотезах, во время переполюсовки магнитосфера Земли на некоторое время исчезнет, на Землю обрушится поток космических лучей, что может представить реальную опасность для обитателей планеты. Особенно, если исчезновение магнитосферы будет сопряжено с истощением озонового слоя.

Смена полюсов происходит примерно каждые 500 тыс. лет. Однако нынешний период распределения магнитных полюсов затянулся - они не менялись местами уже более 750 тыс. лет.

В 2007 году в Центре космических исследований Дании, после анализа новейших данных, полученных со спутника, осуществляющего мониторинг - полей Земли, пришли к неутешительным выводам. По мнению датских ученых, происходит интенсивная подготовка геомагнитного поля Земли к инверсии магнитных полюсов, и это может произойти значительно раньше, чем ожидалось. С этими данными, частично согласуются и результаты исследований ИЗМИРАН.

К каким еще последствиям может привести продолжающееся и ускоряющееся смещение магнитных полюсов? Учитывая, что данный процесс сопровождается снижением напряженности магнитного поля Земли, можно предположить, что это должно повлиять на глобальные климатические изменения. С одной стороны, ослабление геомагнитного поля приведет к разрушению озонового слоя и увеличению проникновения в атмосферу электромагнитного излучения, особенно в ультрафиолетовом спектре, а также потока заряженных частиц высоких энергий. Соответствующие изменения произойдут, естественно, и в ионосфере. Все эти физические следствия снижения напряженности магнитного поля Земли могут привести к перераспределению атмосферных потоков и циклонов и, как следствие, глобальным климатическим изменениям. Смещение вместе с магнитными полюсами и каспов приводит к перераспределению падающих на Землю корпускулярных и волновых потоков энергии, что, в свою очередь, изменяет сложившийся баланс атмосферных циркуляций. Этот фактор, к сожалению, не

учитывается климатологами при оценках возможных глобальных климатических изменений в будущем.

Безусловно, трудно прогнозировать возможное развитие ситуации с дальнейшим движением геомагнитных полюсов, и выразим надежду, что этот процесс все же не будет столь быстротечным.

Вариации измеренных значений гравитационной постоянной G и их возможные причины

Одним из основных выводов настоящих исследований является то, что фактически измеряемые различными исследователями на протяжении многих лет вариации гравитационной постоянной не являются результатом некорректности измерений или погрешностей приборов. Измеренные в разных странах ведущими научными центрами, вариации значений G примерно на два-три порядка превышают погрешность современных установок по измерению гравитационной постоянной.

В то же время, мониторинг значений G , проведенный в течение 16 лет российскими учеными О.В. Карагиозом и В.П. Измайловым, показал, что вариации G во времени имеют статистически достоверный волновой характер.

Одним из важных аспектов, отраженных в монографии, является показанное различие в физической сути волновых и циклических процессов. В связи с этим необходимо использовать различные подходы при анализе и оценке циклических и волновых процессов.

Главным отличием волнового процесса от циклического является то, что в волновом процессе отрицательная часть полуволны несет энергию, равную той, которая содержится в положительной части, но противоположную по знаку. В то же время в циклических процессах минимальные значения отражают наименьшее выделение энергии, а максимальные - наибольшее. Это необходимо учитывать при установлении причинно-следственной связи и корреляционном анализе циклических и волновых процессов.

В результате проведенных исследований авторы высказывают предположение, что зарегистрированные различными учеными Мира вариации измеренных значений G представляют собой волновой процесс и могут являться как следствием влияния геодинамических процессов на показания весов Кавендиша, так и результатом прохождения через Землю сверхдлинных гравитационных волн (СГВ).

Показано, что при прохождении через Землю СГВ зарегистрированные в различных точках земного шара значения гравитационной постоянной будут отличаться друг от друга, в зависимости от ориентации весов Кавендиша по отношению к направлению распространения СГВ. Получение одинаковых значений

G, зарегистрированных одновременно в разных точках земного шара, возможно только в одном случае - в момент смены полуволн СГВ.

Многолетние вариации G

1. Анализ многолетних вариаций измеренных значений G с 1985 по 2000 годы приводит авторов к заключению о том, что они отражают волновые изменения G, являющиеся результатом наложения сверхдлинных гравитационных волн трех порядков, с периодами 40-60 лет, 7,7 лет и 2-2,5 года.

Прохождение СГВ вызывает квадрупольную деформацию Земли, что подтвердилось недавним открытием, сделанным Кристофером Коксом (Christopher Cox) из исследовательской компании Raytheon и Вениамином Чао (Benjamin Chao) из центра НАСА в Мэриленде на основании изучения долгосрочных вариаций в зональном коэффициенте сферической гармоник Земли второй степени, так называемого коэффициента J_2 . Они обнаружили с помощью искусственных спутников Земли и лазерных измерений квадрупольное изменение формы и размеров Земли, уменьшение ее радиуса в полюсах и его увеличение по экватору. Именно такая реакция формы и размеров Земли возможна при прохождении через нее гравитационной волны.

2. Исследование корреляционных связей вариаций измеренных значений G и различных геодинамических факторов с 1985 по 2000 годы позволило установить корреляционную связь между СГВ, сейсмической и вулканической активностями Земли и изменениями угловой скорости ее вращения.

3. Анализ пространственно-временных изменений интегральной оси напряжений Земли показал, что они отражают квадрупольный характер деформационных процессов в Земле, что полностью соответствует сформированной автором модели реакции геодинамики Земли на прохождение СГВ.

4. По мнению авторов, прохождение через Землю сверхдлинных гравитационных волн оказывает существенное влияние на формирование основных циклов общепланетарной геодинамической активности. Кроме того, прохождение через нашу планету гравитационных волн различных частот и направлений будет приводить к сложной интерференционной картине, что также должно найти свое отражение в природных процессах.

5. Предложен новый механизм влияния сверхдлинных гравитационных волн на геодинамические процессы и деформацию Земли. Сверхдлинная гравитационная волна, проходя через Землю, создает в каждой точке пространства энергетический пространственный приоритет (ЭПП) для распределения энергетических потоков атмосферы, гидросферы и твердой среды Земли. ЭПП формируется тензором напряжений в гравитационном поле СГВ в каждой точке пространства в конкретный момент времени.

Фактически гравитационная волна пространственно перераспределяет поток энергии в Земле и околоземном пространстве, затрачивая на это несопоставимо меньшую энергию, чем получаемый при этом эффект. В физике известно множество аналогий, широко используемых в электронике, гидродинамике и других сферах для управления и перераспределения электромагнитной или иных видов энергии.

Влияние на геодинамические процессы планет солнечной системы

Влияние гравитационных полей планет Солнечной системы на геодинамические и атмосферные процессы Земли продемонстрировано авторами на примере Марса и Луны. Так, проведенные исследования показали, что в период Великого противостояния Марса с Землей, происходившего 28 августа 2003 года, наблюдалась ярко выраженная аномально высокая активность как атмосферных, так и геологических катаклизмов. Степень активности атмосферных проявлений энергетики планеты (тайфуны, ураганы) и геологических (землетрясения, вулканы) с июля по октябрь 2003 г. превышала фоновые значения примерно в 2,5-3 раза. Между тем, авторами отмечено, что сначала активизируются атмосферные процессы, а затем, когда уже наблюдается спад степени их активности, начинается активизация геодинамических процессов.

Приближение Марса к Земле - это не мгновенный, а постепенный процесс, следовательно, и усиление его гравитационного влияния на Землю происходит постепенно. Если Марс приблизился к Земле в 7 раз, то, исходя из закона всемирного тяготения, гравитационная сила Марса, воздействующая на Землю, увеличилась в этот период в 49 раз!

Что же при этом происходит? Как известно, гравитационное поле, в отличие от магнитного и электрического, воздействует на тела и пространство по-особенному. Т.е. при приближении Марса к Земле, ее форма начинает деформироваться - Земля начинает вытягиваться с противоположных сторон по линии, соединяющей центры Земли и Марса, и сжиматься в перпендикулярном направлении.

Однако этому процессу подвержена не только твердая составляющая Земли, но и атмосфера, а также гидросфера (Мировой океан). Причем атмосфера, являясь менее плотной и более мобильной и чуткой к внешним воздействиям средой, начинает реагировать на приближение Марса значительно раньше. Именно поэтому атмосферные аномалии, выразившиеся в виде тайфунов и ураганов, начали проявляться значительно раньше, еще в июле 2003 года. Гравитационное поле Марса нарушило существующий баланс атмосферной циркуляции. Более того, если бы мы смогли увидеть атмосферу Земли из космоса, то можно было бы заметить, как деформирована ее форма под действием поля гравитации Марса.

Земная кора является твердой средой, и процессы, протекающие в ней, более инертны. Гравитационное поле Марса привело к перераспределению энергии в земной коре и нарушило геодинамический баланс, добавив в общую «энергети-

ческую копилку» и свою немалую долю. Это вывело из состояния равновесия очаги землетрясений, напряжения в которых находились на критическом уровне. В любом случае, по среднемесячным прогнозам сейсмической активности, которые выполняются в НИИ по прогнозу и изучению землетрясений, в начале октября 2003 г., должен был бы начаться очередной трехмесячный цикл сейсмической активности. Но Марс, с одной стороны, ускорил наступление этого цикла, с другой - существенно усилил его амплитуду.

Таким образом, проведя предварительные общие оценки возможности влияния гравитационного поля планет Солнечной системы, на примере Луны и Марса, на климатические и геодинамические процессы, мы приходим к следующим выводам.

Наибольшее влияние на формирование атмосферного и геодинамического режима планеты оказывает воздействие гравитационного поля Луны. В то же время гравитационное взаимодействие Земли и Луны представляет собой, с точки зрения энергообмена, единую систему, формирующую естественные ритмы климатических и геодинамических процессов. Взаимное влияние как Земли на Луну, так и обратный процесс необходимо рассматривать как часть естественного сосуществования двух элементов единой системы. Поэтому взаимные деформации Земли и Луны под действием приливных сил, вызывающие цикличность атмосферных и сейсмических процессов, так же естественны, как и смена дня и ночи или времен года.

Как показали расчеты, с точки зрения мгновенного выделения энергии при приближении Марса не является столь выдающимся событием. Но если учесть, что эта часть гравитационной энергии привносится в общую энергетику Земли в течение нескольких месяцев (период приближения и удаления Марса), то привнесенная часть энергии значительно возрастет и превысит энергию, привносимую Луной во время приливов. Т.е. если лунные приливы не вносят дополнительную энергию в систему Земля-Луна, то марсианский прилив, длящийся несколько месяцев, привносит в систему Земля-Луна дополнительную порцию значительной энергии.

Этот процесс можно рассматривать как своеобразную «накачку» атмосферы и твердой Земли гравитационной энергией, привнесенной Марсом, что может стать причиной нарушения сложившегося энергетического баланса системы Солнце-Земля-Луна, в первую очередь, нарушения циркуляции в атмосфере Земли, которое, в свою очередь, вызывает нарушение хода естественных геодинамических процессов. Именно этим можно объяснить тот факт, что атмосферные процессы начинают реагировать на приближение Марса раньше, после чего начинаются геологические катаклизмы.

В принципе, гравитационное взаимодействие Марса с Землей в периоды великих противостояний, так же, как и других планет, представляют собой один из элементов функционирования Солнечной системы. Эти процессы происходят с определенной периодичностью, но с большим периодом, по сравнению с длитель-

ностью человеческой жизни, в связи с чем они психологически воспринимаются, как артефакты. Если бы лунные приливы в океане происходили с периодичностью 50 или 100 лет, то они воспринимались бы как глобальные природные катаклизмы, при которых затапливаются колоссальные площади суши. Но океанские приливы никого не пугают, а воспринимаются как естественный элемент бытия.

Поэтому, при рассмотрении природных катастроф, немалое значение имеет фактор чисто психологического восприятия того или иного природного явления по отношению к жизнедеятельности людей.

Так, например, если процесс затопления территорий растянут во времени, по сравнению с длительностью человеческой жизни, то он не будет восприниматься в качестве природного катаклизма, несмотря на то, что его масштабы могут быть значительно больше, чем при быстром затоплении. В то же время, с геологической точки зрения, процесс длительного, но более масштабного затопления может быть рассмотрен в качестве глобальной природной катастрофы.

Неприливные вариации силы тяжести и их возможная природа

Проявление цикличности в гравитационном поле Земли при геофизических исследованиях неприливных вариаций силы тяжести привело к интересным выводам. Так, с помощью станции «Бинагади» (Апшеронский полуостров), осуществляющей мониторинг силы тяжести на протяжении последних нескольких лет, были установлены существенные неприливные аномалии силы тяжести (0,5-1,5 мГал), возникающие за 1-3 недели до сильных удаленных землетрясений. Необычность данного факта заключена прежде всего в расстояниях, отделяющих регистрирующую станцию от очагов будущих землетрясений, превышающих в отдельных случаях 10 тысяч километров. Показана статистическая достоверность полученных результатов, подтверждаемых непрерывными наблюдениями на станции «Бинагади» с января 2004 по май 2008 года (в настоящее время наблюдения продолжаются). Так, регистрация гравитационного предвестника станцией «Бинагади» в 90% случаев наблюдается перед сильными удаленными землетрясениями восточного полушария с магнитудой $>6,5$. В книге сделана попытка логического объяснения этого факта, в частности, прохождением под станцией «Бинагади» тектонических волн, предшествующих удаленным сильным землетрясениям. Рассмотрены возможные источники тектонических волн.

Показано влияние гравитационного поля планет Солнечной системы на сейсмические и вулканические проявления, приведены некоторые расчеты и предложен возможный механизм этих влияний.

Глобальные климатические изменения и геодинамические процессы

В последние годы большое внимание уделяется проблеме глобальных климатических изменений. Специальные экспертные структуры ООН пришли к выво-

ду, что основной причиной глобальных изменений климата в течение последних двух столетий является техногенная деятельность человека. Но только ли в этом причина глобального потепления на самом деле?

При написании настоящего раздела мы ни в коей мере не ставили задачу вступления в полемику с экспертными структурами ООН относительно сделанных ими выводов. Нашей целью всего лишь является попытка показать, что на фоне действительно пагубного влияния техногенной деятельности человечества на природную среду и, в частности, на глобальные климатические изменения, нельзя умалять роль эндогенных геологических процессов, которые также оказывают существенное влияние на климатические изменения в общепланетарном масштабе. Резюмируя многолетние исследования по изучению пространственно-временных закономерностей вулканической и сейсмической активностей Земли, нам трудно избавиться от впечатления, что наблюдаемые в настоящее время глобальные климатические изменения, в частности, глобальное потепление, в большей степени обязано повышению активности магматических вулканов поясов сжатия Земли, сохраняющих эту тенденцию в течение последних 200 лет.

Нами использовались материалы, приведенные в последнем отчете (2007) Межправительственной комиссии по изменению климата (IPCC).

Однако главное влияние на климат, по мнению IPCC, человечество оказывает увеличением не столько выбросов аэрозолей, сколько парниковых газов: CO_2 , CH_4 , N_2O и фреонов. Детальные наблюдения за концентрацией CO_2 в атмосфере ведутся уже многие годы на обсерватории Мауна-Лоа (Гавайские о-ва) и на Южном полюсе. Современная концентрация метана в атмосфере равна 1,7 ррт, что в 2,5 раза больше максимума, выявленного по керну из района станции Восток (IPCC, 2007).

В то же время известно, что CO_2 вместе с другими газами выделяется в огромных количествах при извержениях магматических вулканов. Для выяснения степени возможного влияния цикличности в извержениях вулканов на глобальное потепление климата нами были сопоставлены графики среднего изменения температур на Земле и среднего числа извержений магматических вулканов поясов сжатия Земли с 1850 по 2000 годы,

Как отмечалось в предыдущих разделах, около 90% доли энергии и выбросов в атмосферу высвобождается при извержениях магматических вулканов типа С.

Сравнение графиков показало высокое сходство характеров изменений во времени как среднегодовой температуры, так и вулканической активности. Оба графика можно условно разделить на три этапа: 1850-1915 гг.; 1916-1965 гг.; 1966-2000 гг. Каждый этап характеризуется резким повышением, как температуры, так и вулканической активности - в 1915 году и в 1965 годах. Примечательно, что на первом этапе на обоих графиках выделяется три цикла активизации, на втором этапе - два цикла, на третьем этапе также два неполных цикла.

Наиболее интересным фактом является запаздывание циклов повышения температуры по отношению к циклам увеличения вулканической активности.

В предыдущих разделах мы детально останавливались на обосновании причин запаздывания цикличностей одних процессов относительно других. В основе этого запаздывания лежит причинно-следственная связь между этими двумя процессами. Напомним, что в процессе исследования причины запаздывания вулканической активности по отношению к солнечной мы также использовали принцип причинно-следственной связи. Именно повышение солнечной активности является причиной повышения вулканической активности, которое является следствием, но никак ни наоборот.

Этот же принцип нами используется при исследовании причинно-следственной связи изменений числа извержений вулканов, которые являются причиной и изменений температуры Земли, которые являются следствием.

Рассмотрим механизм причинно-следственной связи вулканической активности и изменения температуры на Земле. Повышение числа извержений вулканов приводит к увеличению поступления в атмосферу вулканических газов, в частности CO_2 , способствующих усилению парникового эффекта и, как следствие, приводящих к повышению температуры атмосферы. С 1860 года по 2000 год число извержений вулканов увеличилось на 80%.

Судя по графикам, увеличение числа извержений вулканов в среднем на 5 извержений в год соответствует увеличению температуры на $0,4^\circ\text{C}$. Высокое сходство графиков глобальных изменений температуры на нашей планете и вулканической активности Земли имеют логическое обоснование с точки зрения физических аспектов. Увеличение практически вдвое среднегодового числа извержений вулканов должно привести к увеличению вдвое поступающих в атмосферу газов при извержениях вулканов, и прежде всего CO_2 , которому отводится ведущая роль в формировании парникового эффекта и повышении среднегодовой температуры на Земле.

На основе установленных корреляционных особенностей и использования выдвигаемого нами принципа причинно-следственной связи различных природных процессов нами сделана попытка долгосрочного прогноза как изменения вулканической активности поясов сжатия Земли, так и глобального изменения средней температуры на нашей планете до 2060 года. При построении прогнозной части графика нами был учтен период запаздывания максимумов среднего повышения температуры Земли по отношению к максимумам вулканической активности, а также соотношения амплитуд циклов повышения средней температуры Земли по отношению к циклам повышенной вулканической активности. Насколько верны наши выкладки и предположения, покажет будущее.

Единство и гармония

Таким образом, подводя итог нашим исследованиям и умозаключениям, мы хотели бы отметить, что в настоящем труде рассмотрена лишь малая доля фак-

торов и процессов, воздействующих на формирование цикличностей геодинамических процессов. Нам, безусловно, хотелось систематизировать и увязать в единую модель указанные факторы и процессы, что достаточно сложно воспроизвести только словесно, но можно попытаться это сделать в сопровождении схематических изображений.

Чтобы начать создание модели, мы вынуждены начать с момента зарождения Вселенной, то есть с отправной точки - момента Большого взрыва.

Для описания начального момента этого процесса было введено понятие космологической сингулярности (рис. 156).

Космологическая сингулярность - состояние Вселенной в начальный момент Большого Взрыва, характеризующееся бесконечной плотностью и температурой вещества. Космологическая сингулярность является одним из примеров гравитационных сингулярностей, предсказываемых общей теорией относительности и некоторыми другими теориями гравитации. Возникновение этой сингулярности при продолжении назад во времени любого решения ОТО было строго доказано в 1967 году Стивеном Хокингом. Таким образом, первый импульс к созданию самого крупного цикла в развитии Вселенной был задан Большим взрывом. В момент Большого Взрыва в пространство выплеснулись энергия и материя, и этот всплеск сформировал излучение энергии в гигантском спектре частот.

Что формирует период волны, несущей в себе энергию, будь то электромагнитная энергия либо гравитационная? Из физики хорошо известно, что длина излучаемой волны будет соразмерна линейным параметрам излучающей систе-

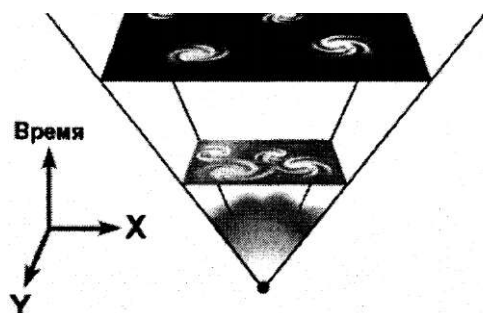


Рис. 156. Сингулярность (http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%88%D0%BE%D0%B9_%D0%B2%D0%B7%D1%80%D1%8B%D0%B2)

мы (антенны). Не останавливаясь подробно на хорошо изученных и описанных в литературе по электродинамике методах расчета соотношений линейных размеров излучающих/приемных антенн и длин излучаемых/принимаемых электромагнитных волн, отметим, что линейный размер антенны должен быть не менее 0,4 длины излучаемой/принимаемой волны. Это соотношение сохраняется и для гравитационных волн.

Итак, в момент Большого Взрыва в пространство выплеснулась гигантская энергия, в том числе в виде гравитационных волн, которые, как предполагается, и сейчас бороздят пространство Вселенной в виде реликтового излучения. Но не все так просто, как хотелось бы. Дело в том, что гравитационные волны не могут быть излучены сферической областью. Как указано в одной из опубликованных работ А.Эйнштейна, посвященной природе гравитационных волн (Einstein, 1918), «...механическая система, постоянно сохраняющая сферическую симметрию, не может излучать».

Между тем, как показали новейшие астрофизические наблюдения, форма Вселенной весьма далека от сферической и сильно сплюснута, а, следовательно, в момент Большого Взрыва были весьма благоприятные условия для излучения энергии в форме гравитационных волн.

Первые результаты, полученные космической обсерваторией WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), измерявшей мощность реликтового излучения, были опубликованы в январе 2003 года и содержали так много долгожданной информации, что ее осознание не завершено и сегодня.

На основе полученных космической радиообсерваторией данных удалось с беспрецедентной точностью определить огромное количество космологических параметров. Во-первых, отношение полной плотности Вселенной к критической - $1,02 \pm 0,02$ (то есть наша Вселенная плоская или замкнутая с очень малой кривизной). Во-вторых, постоянную Хаббла, характеризующую расширение нашего Мира на больших масштабах, - 72 ± 2 км/с/Мпк. В-третьих, возраст Вселенной - $13,4 \pm 0,3$ млрд. лет, и красное смещение, соответствующее времени рекомбинации, - 1088 ± 2 (это среднее значение, толщина границы рекомбинации существенно больше указанной ошибки) (<http://galspace.spb.ru/index77.html>).

Таким образом, гравитационные волны с максимальной длиной и энергией (амплитудой) могли быть образованы только в момент Большого Взрыва. Эти волны проходя через космическое пространство и, естественно, через Землю, могут влиять на формирование наиболее крупномасштабных циклов геодинамической активности.

Чем больше линейные размеры излучающей системы, тем более крупные циклы ею генерируются.

Менее масштабные процессы, такие, как слияния черных дыр, взрывы сверхновых и т.д., могут формировать в космическом пространстве гравитационные волны существенно меньших длин волн, и их прохождение через Землю будет влиять на формирование циклов меньших периодов.

Между тем, как было сказано выше, в формировании циклов геодинамической активности играют роль огромное количество факторов как эндогенного, так и экзогенного характера. Наиболее масштабное влияние на формирование цикличностей многих процессов как в геосфере, так и в биосфере Земли оказывает солнечная активность, с основными циклами в среднем 11 лет, 22 года, 75-80 лет. Любое вращение космического тела по своей орбите является циклическим процессом и вызывает цикличность, соответствующую периоду вращения. Таким образом, движение солнечной системы по Галактической орбите вызывает «Галактический цикл». Аналогично этому, соответствующие цикличности вызывают движения Земли вокруг Солнца, вращение Земли вокруг своей оси, обращение Луны вокруг Земли, изменения положений планет Солнечной системы по отношению к Земле и т.д. Мы можем до бесконечности рассматривать любые циклические процессы, которых в природе бесконечное множество. Между тем существуют определенные глобальные закономерности, являющиеся основополагающими в формировании цикличности геодинамических процессов. Основополагающей закономерностью является «иерархия», и данный термин нами не понимается как наличие каких-либо соотношений между различными циклами, как это рассматривается различными исследователями, хотя и эта возможность тоже не исключается. В понятие «иерархии» мы вносим скорее принцип инвариантности и направленности влияния одного процесса на другой сверху вниз, с точки зрения масштабности. Считая справедливой философскую мысль о том, что любое событие в любой точке пространства во Вселенной в той или иной мере имеет отражение во всех остальных точках пространства, тем не менее мы должны признать, что события масштаба Вселенной имеют большее влияние на все элементы Вселенной (галактики, звездные шарообразные и пылевые образования, звезды, черные дыры, планеты и т.д.), чем события, связанные с каждым элементом Вселенной в отдельности. Иерархия в масштабах и направленности является одним из основополагающих принципов взаимодействия в природе, и этот принцип неразрывно связан с принципом причинно-следственной связи. Эта мысль была нами рассмотрена в разделе о причинно-следственных связях в геологии, и мы хотели бы повторить в качестве примера, что Солнечная активность влияет на Землю гораздо больше, чем сейсмическая и вулканическая активность на процессы на Солнце.

На рис. 157 показана схема, отражающая иерархию причинно-следственных связей Земли с Космосом, в зависимости от космического фактора, влияющего на Землю.

Таким образом, принимая во внимание наши умозаключения, можно предположить, что наибольшим периодом во Вселенной будут обладать волны, длина которых соизмерима с размерами Вселенной. Но каковы ее размеры на самом деле? Исходная точка частицы света - фотона, достигшего нас сегодня и находившегося в пути 13,7 миллиардов лет, сейчас находится на расстоянии в 78 миллиардов световых лет от нас. Это и составляет радиус Вселенной.



Рис. 157. Иерархия причинно-следственных связей

Стрелкой показана направленность в иерархии влияния космических процессов на Землю

Такая оценка была сделана после анализа данных, полученных космическим зондом для исследования микроволновой анизотропии WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), изучавшим реликтовое излучение, возникшее примерно через 400 тысяч лет после «Большого Взрыва» (http://news.bbc.co.uk/hi/russian/sci/tech/newsid_3758000/3758599.stm).

Если геодинамический цикл сформирован внешним воздействием волнового характера, например, в результате прохождения через Землю сверхдлинных гравитационных волн, то период цикла будет зависеть от длины волны, а, следовательно, от линейных размеров источника гравитационного излучения. На рис. 158 схематически показана зависимость длин излучаемых волн или периодов генерируемых ими циклов от размеров их источника во Вселенной.

Как видно из схемы, чем больше линейные размеры систем, тем больше периоды формируемых ими циклов.

Так, в работе В.Е. Хаина и М.А. Гончарова (2006) проведено детальное сопоставление высказанных ранее идей об иерархической геодинамической цикличности и геодинамике иерархически соподчиненных геосфер. Показано наличие определенной связи между периодами (рангами) циклов и масштабами формирующих их систем.

Если за исходную точку отсчета взять момент Большого Взрыва, охватывающий первые 400 тысяч лет жизни Вселенной, то радиус излучаемой системы (радиус Вселенной) в исходный момент, как описывалось выше, составит 13,7 миллиардов световых лет.

Используя эти величины, можно попытаться вывести закономерность, увязывающую период формируемой во Вселенной цикличности или излучаемых волн в зависимости от линейных размеров рассматриваемой космической системы.

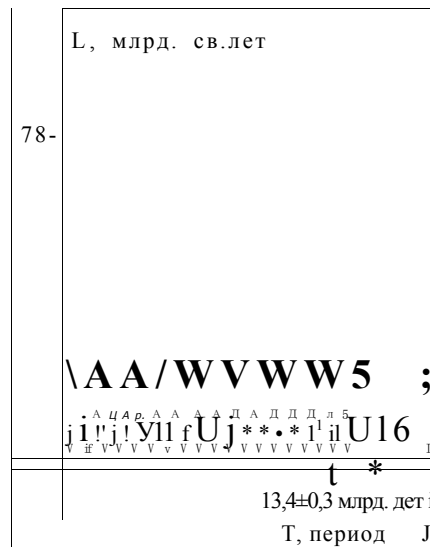


Рис. 158. Схема зависимости периодов волн от линейных размеров источника излучения во Вселенной (масштаб условный)

L - линейный размер источника излучения в млрд. световых лет; T - период излучаемой волны

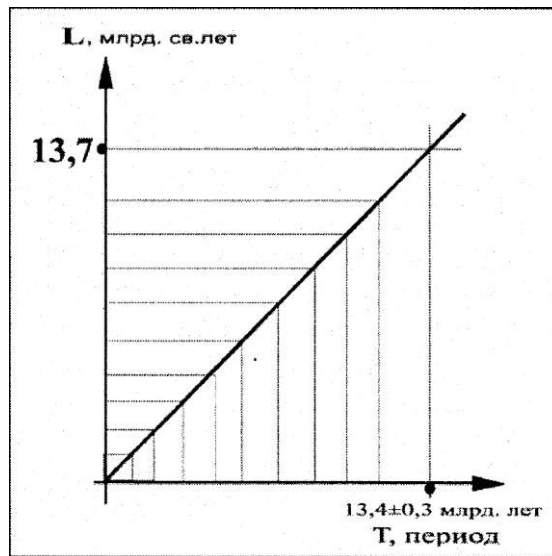


Рис. 159. График зависимости периода генерируемого цикла (излучаемой волны) от радиуса излучающей системы (Ханн, Халилов, 2008)

На рис. 159 показан график зависимости периода генерируемого цикла (излучаемой волны) от радиуса излучающей системы.

Таким образом, нами выдвигается принцип инвариантности периода цикла и линейных размеров формирующей его системы - принцип Хаина-Халилова. Ниже приводится сформулированная нами трактовка данного принципа.

Период генерируемых системой циклов прямо пропорционален линейным размерам данной системы.

Для математического описания данной закономерности нами предлагается введение коэффициента циклической инвариантности:

$$K = T/L,$$

где K - коэффициент циклической инвариантности (постоянная Хаина-Халилова); T - период генерируемого цикла; L - линейные размеры генерирующей системы.

Рассматривая в качестве первичной эталонной системы Вселенную и формируемые ею периоды цикличности, мы можем вычислить коэффициент циклической инвариантности:

$$K = 13,7/13,4 = 1,02.$$

Таким образом, коэффициент циклической инвариантности равен 1,02, т.е. равен примерно единице. Используя это соотношение, можно вычислить периоды циклов, генерируемых различными системами как на Земле, так и в Космосе (галактики, звездные системы, шаровые образования, звезды и т.д.).

Между тем, необходимо отметить, что при изучении цикличностей и причин, их обусловивших, на пути исследователей встают серьезные проблемы которые, зачастую приводят к серьезным заблуждениям. Порой два процесса, имеющих совершенно идентичную цикличность с высокой степенью корреляции, на самом деле могут не иметь никакой физической связи между собой, но они могут быть связаны с третьим, воздействующим на оба процесса, фактором более высокого порядка. Например, 11-летняя цикличность в урожайности пшеницы никак не связана с 11-летней цикличностью сейсмической активности, но оба этих процесса непосредственно связаны с влиянием солнечной активности. Дело в том, что наложение цикличностей разных масштабов могут вызывать появление совершенно новых цикличностей с новыми параметрами; при этом несущие частоты, сформировавшие эту новую цикличность, могут быть практически невидимы в изучаемом интервале времени. Приведем конкретный пример.

Возьмем самый простой цикл 1 на рис. 160 и наложим на него поочередно циклы с разными периодами. Результат полученной картины мы видим на рис. 160.

Если исследователь будет изучать результирующие наложения двух простых циклов (двух синусоид), то при рассмотрении результирующих цикличностей E и D он может заметить некоторый тренд, но при изучении результирующих

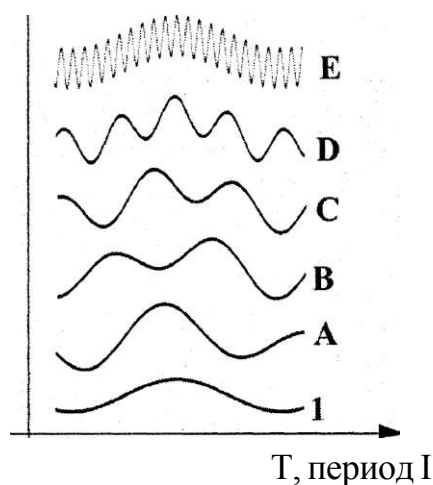


Рис. 160. Результат наложения на цикл 1 циклов с разными частотами

циклическостей А, В и С понять существование наложения двух циклов весьма сложно. Если же принять во внимание, что накладываемые циклическости бывают весьма далеки от идеальных синусоид и сами могут быть результатом наложения других циклическостей, становится понятно, насколько трудной задачей является установление причинно-следственных связей между различными циклическими процессами.

Пожалуй, серьезным подспорьем для снижения вероятности ошибки в оценке взаимовлияния циклическостей двух или более процессов могут быть прямые инструментальные измерения, например, измерения глобальных вариаций гравитационного поля, или физическая логика, обосновывающая взаимосвязь данных процессов. Во втором случае речь может идти, к примеру, о таких явно либо косвенно взаимосвязанных циклических процессах, как вращение Луны вокруг Земли, вызывающее приливы в твердой Земле, регистрируемые с помощью гравиметров, смена дня и ночи, времен года и т.д. Косвенно взаимосвязанными процессами являются, например, наблюдаемые явно выраженные зависимости, установленные А.Л. Чижевским: влияние Солнечной активности на различные процессы в биосфере - на частоты эпидемий различных заболеваний, атмосферных аномалий и т.д., что может быть логически объяснено цепочкой тесно взаимосвязанных физико-химических процессов.

Мы начали повествование настоящего труда со слов Альберта Эйнштейна, и хотим закончить его словами Макса Планка:

«И в самом деле, насколько жалкими и маленькими, насколько бессильными мы, люди, должны себе казаться, если вспомнить о том, что Земля, на

которой мы живем, есть лишь мельчайшая пылинка в поистине бесконечном пространстве космоса, т.е. фактически ничто, и насколько странным, с другой стороны, должно нам казаться то, что мы, крошечные существа на произвольно малой планете, в состоянии познать пусть не сущность, но хотя бы наличие и размеры элементарных кирпичиков всего огромного мироздания». (Доклад, прочитанный в мае 1937 года в Дерптском (Тартуском) университете. Max Planck. Religion und Naturwissenschaft. Vortrag gehalten im Baltikum (Mai 1937) von Dr. Max Planck. 2te unveränd. Auflage. Joh. Ambrosius Barth Verl. Leipzig, 1938).

Безусловно, что выводы авторов не являются бесспорными и могут претерпеть дополнения или изменения при проведении дальнейших исследований, а также в результате исследований других ученых. Между тем, мы надеемся, что эта работа не оставит читателя равнодушным и предоставит ему широкое поле для дальнейших размышлений.

CONCLUSION

This work is devoted to further advances in the research on the cyclicity in geodynamic processes, regarding the Earth as an element of the multifunctional cosmic system.

CYCLICITY is a fundamental feature characteristic of the majority of natural processes, which go on both in micro or macroworld, and we would like to illustrate it with particular facts and examples.

How does Earth interact with other elements of cosmic space, and what is the role of these relations in the evolution of the Earth and its geospheres: the magnetosphere, atmosphere, hydrosphere, and tectonosphere? We would like to discuss some aspects of the cosmos-Earth relations; first of all, we refer to the solar system. Special consideration is given to studies and assessment of the effects of the solar energy, planets of the Solar system, in particular, the Moon, Mars, and Venus on geodynamic processes and the Earth's position in its orbit, etc. Gravitational effects of Mars and the Moon on atmospheric and geodynamic processes were calculated and certain mechanisms of this influence were proposed. Much attention is given in the book to the role of the gravitational factor in the development of cycles in natural processes, in particular, to the influence of super-long gravitational waves of cosmic origin on the geodynamics and geometrical parameters of the Earth.

Gravitation plays the leading role in the evolution of the Universe and cosmos, in developing interactions and movements of all elements of cosmic space: galaxies, star clusters, black holes, planets, and other cosmic objects and units.

On the one hand, gravitation is one of most thoroughly studied and, on the other hand, one of least explored and mysterious natural phenomenon. The recent discovery of «concealed mass» and «dark material», the nature of which is not yet clear, is its spectacular confirmation.

Apart from gravitation, much attention in the book is given to other factors, which contribute to the formation of cycles in geological processes of various proportions.

Our purpose is to show that the problem of gravitational waves that seemed to be purely astrophysical is in fact concerned with geophysics and geology, and, first of all, with geodynamics, a science, which studies the dynamics of geological and geophysical processes.

In what way do gravitational waves, varying in amplitude and length, passing through Earth, affect geodynamic processes, and how they are reflected in deformations

of the Earth, in movements of lithospheric plates, and external energy of the planet, manifested in seismic variations, volcanic activity, etc.

Astrophysicists have not so far managed to record gravitational waves with technical devices. Incidentally, Earth itself is a complex energy-based system, responsive to external influence. The authors made an attempt to view Earth itself as a detector of gravitational waves, or to be more precise, reaction of geodynamic processes to passing of gravitational waves.

Earth Origin and Evolution

Over latest decades, considerable advances have been made in solving the problem of the origin of the solar system and our Earth as its integral part. However, some aspects of this problem, among them very significant ones, might be interpreted variably.

In what state did new-born Earth appear after its accretion stage? Was it cold or hot, homogeneous or heterogeneous, i.e., whether it presented a cluster of bodies of different dimensions and composition, or it was regularly stratified in the vertical direction? These are the problems, the solution of which is of primary importance for all experts involved in studying Earth.

Considering problems of the origin of the Solar system, we can state that by the present, overwhelming majority of Russian (Vityazev et al., 2007) and foreign (Russell, 2007) researchers have nearly reached a consensus on most probable scenario of its formation. The scenario consists of three stages:

1. Appearance, 4568-4570 Ma years ago, of a new star, the Sun, and a gas-dust disk around it, just like it was discovered with Spitzer space telescope around several young stars. The matter of the gas-dust disk included products of the Supernova explosion in the form of heavy radionuclides. This explosion served as an impulse to formation of the Sun and gas-dust disk around it. This stage might have been very brief, only several hundreds of thousands years.

2. The matter of the gas-dust disk condenses under the influence of gravitation with concurrent formation of planetesimals, a kilometer to hundreds of kilometers in size. Further they gave rise to formation of planets; their remnants are asteroids forming the belt between Mars and Jupiter. This stage could have lasted for several millions of years.

3. Gravitational accretion of planetesimals led to origin of planets. The planets of the Earth group were formed in the internal zone of the protoplanet disk, where the temperature was above 0°, and the rest, mostly composed of ice, were formed in the external part of the disk, where the temperature was lower. The accretion stage lasted for several tens (up to 100) of millions years. 50-70 mln years after it began, a violent impact caused release of matter, out of which the Moon was farther generated.

Upper Earth developed at the preplate-tectonic stage, from the magmatic ocean through meteoritic craters, hot spots, continental rifts, and at the plate-tectonic stage,

from the embryonic multiplate tectonics of the Late Archean, through tectonics of lesser plates of the Early Proterozoic to the full-scale plate tectonics of the Late Proterozoic-Phanerozoic.

Being originated in the Archean, the plate tectonics evolved during the Early and Middle Proterozoic, until the beginning of the Late Proterozoic, when it reached its present mode of occurrence.

Cyclicity in Earth development

Cyclicity is a basic law of natural development in micro and macroworld. Cyclicity is virtually inherent in all processes and its scale varies from hundreds of millions of years to several hours (a period of Earth oscillations proper is 54 minutes, on the average).

Thus, chronology of sheet glaciation in the Earth's history has a well-pronounced cyclic character.

The most ancient glaciation established in South Africa (Kaapvaal eocraton) was dated as 2.9 Ga (Young et al., 1998). Periglacial formations of somewhat younger age, though also Late Archean (2.53 Ga), were discovered in the Tanzania eocraton in Eastern-Central Africa.

As reported by G. Crowell, the age of the Early Proterozoic glaciation period varies in the interval of 2.4-2.2 Ga; its most reliable evidence is in the Canadian Shield. There are some indications of glaciation occurrence at the end of the Middle Proterozoic and their age is 1.1-1.0 Ga again at the Canadian Shield and in Western and, probably, Central Africa, but this evidence does not seem plausible (Evans, 2000).

In the Late Proterozoic, sheet glaciation was most widespread, probably during the whole history of the Earth. Their traces were recorded in all continents, and two intervals are most clearly identified: Late Riphean, 740-720 Ma ago (all continents) and Early Vendian, 620-600 Ma ago (most continents). The former period is known in Australia as the Sturtian, in North America, as Rapitan; the latter has been long known in Europe as Varangian or Laplandian and in Australia, as Marinoan. However, in the literature, some later glacial epochs are mentioned: 580-570 Ma ago (Late Vendian, Avalonian-Cadomian) and 454 Ma ago (Vendian-Cambrian boundary, Laurentian, West Africa, South America).

According to Crowell, the Paleozoic glaciations are dated as follows:

- 445-429 Ma, Late Ordovician–Early Silurian;
- 363-353 Ma, Late Devonian–Early Carboniferous
- 338-256 Ma, Late Paleozoic.

The Late Cenozoic glaciation of in the Antarctic region is dated to have occurred no later than 38 Ma years ago, and in the Arctic region, 2.7 Ma years ago.

Cycles are also clearly pronounced in geotectonic activity. Development of mountains is irregular, at times it appreciably intensifies, which is reflected in rates of

erosion and sedimentation. For instance, in the Himalayas, erosion increasing phases (more than 1 mm/yr) are recorded at the boundaries of 22, 20, 18, 15, 12, and 5 Ma ago. There are estimations suggesting that two other phases were particularly significant: from 10.9 to 7.5 and after 0.9 Ma ago (mineralogical studies of sediments of the Bengal alluvial fan) (P. Copeland et al., 1993).

N.A. Bozhko identifies 11 supercontinental cycles in the Earth history beginning from 4190 Ma ago, specifying that in the well-known geological record only 8 out of them can be established, with culmination at the boundaries of 3005, 2610, 2215, 1800, 1415, 1020, 625, and 230 Ma ago (one can see that all these boundaries coincide with those distinguished by other researchers).

Earthquakes, tsunamis, large landslides, rock falls, and volcanic eruptions, particularly violent hurricanes are certainly geological hazards. They carry away thousands, occasionally tens and even hundreds of thousands of human lives, and it is not surprising that a special international program is developed for forecasting hazardous situations and possible mitigation of their consequences.

A most violent catastrophe, which happened in the recent history of Earth, was the one described in the Old Testament as the Deluge. Well before the appearance in the 1920s of works by English geologists W. Buckland and A. Sedgwick, this event was regarded as real, and the entire history of Earth was divided into two eras: before and after the Deluge. However, further, the views of "diluvianists", as they were called (the Latin for deluge is «diluvio») were rejected and even derided. Nowadays it turns out that there is much truth in Old Testament writings. Recently Austrian scientists from the Vienna University Edith Cristian Tollman and Alexander Tollman have published a serious research (Cristian-Tollman and Tollman, 1991), in which on the basis of the evidence derived from different sources, they determined the precise date of this event: September 23, 9545 BC, i.e., the beginning of the Holocene.

The event itself was interpreted as collision of Earth with a comet, Fragments of the comet fell into the ocean generating an earthquake of enormous proportion, violent volcano eruptions, huge tsunami waves, hurricanes, and rain showers of a global scale, sharp rises in temperature, forest fires, general darkening, and then cooling (of «nuclear winter» type). The deluge caused disappearance of some representatives of then-existing terrestrial fauna, including mammoths, while primitive peoples survived only in caves. One of evidences of that event is rain-like precipitating of rounded tektites over a vast area embracing Asia, Australia, Southern India, and Madagascar. The age of tektite-bearing sequences in Vietnam, about 10 ka (Izokh, 1991), coincides with date of the "Deluge", established by the Tollmans on the basis of other data: annual wood rings, sharp increase of the acid content in the Greenland ice cover, time of extinction of mammoths in Siberia.

There is every reason to suggest that similar hazards, provoked by collisions with comets (like the Tunguska event), or by falling of large meteorites (asteroids), repeatedly occurred in earlier geological epochs bringing about «great extinctions» of fauna and

flora. The list of natural hazards of purely terrestrial origin should be supplemented by those related to Earth-Cosmos interactions.

Thus, data on recent geological processes, both endogenetic and exogenetic, show that they proceed in a continuous-intermittent manner, their slow smooth course is interrupted by sharp accelerations, the effect of which during short time intervals is much greater than that of slow changes occurring during longer time periods, that separate those acceleration intervals.

For nearly 4.6 billion years of its history, our planet and processes going on in its interior and on its surface underwent considerable changes. They resulted from changing physical and astronomical parameters, which controlled the development of geological processes. Among the astronomical parameters, the most important was the distance between the Moon and Earth, with concurrent decrease in the amplitude of solid tides, slowing down the rotation of the Earth's axis, and subsequent increase in the day-and-night duration and in inclination of the rotation axis, as well as growing radiance of the Sun and, consequently, insolation of the Earth's surface.

Nevertheless, the role of change associated with the planet's interior was much greater. The dominating factor here is a decreasing deep heat flow, estimated to be now 3–4 times lower than in the Archean. This age-old cooling of the Earth was associated with depletion of its main sources of warming, heat, which, first, was acquired by Earth during accretion; secondly, released during formation of the nucleus, and in the process of crust differentiation, including the formation of the internal nucleus involving crystallization of matter in the external nucleus; thirdly, it was produced by solid moon-solar tides, and, finally, in the fourth place, by decay of natural radioactive elements and their isotopes. The release of heat from the Earth interior was accompanied by its degassing, to be more precise, defluidization, which decreases during the Earth development, judging, in particular, by the development of processes of granite- and pegmatite formation, as well as metamorphism and metasomatism, which were most intense in the Early Precambrian.

In contrast with degradation of the Earth endogenous energy, the role of the energy, generated during biosphere evolution, became increasingly important. The volume of biomass on the Earth's surface and its energy potential were growing, and life penetrated deep into oceans, into the Earth interior, and into the upper levels of the atmosphere. Due to subduction experienced by the Earth lithosphere for 3.5 Ga, if not more, products of active life of organisms, and primarily, organic carbon, could have been sucked deep into Earth, at least, up to the boundary between the upper and lower mantle (660 km), and, probably, up to the border of the nucleus, and then be involved in advection of fluids from that depth. The influence of living matter on geological processes is culminated by geological activities of man, who has widened the boundaries of his penetration deep into Earth and ocean to 11–12 km, and into Cosmos, to remote parts of the Solar system.

Due to repeated changes in the number and arrangement of lithospheric plates and their boundaries as well as the character of the relations among them and to corresponding

changes in stress fields, the structural plan of the earth crust and lithosphere became more complicated, causing disharmony among structures of different levels and evoking horizontal detachments in separate lithospheric layers.

One of the most important aspects of the Earth evolution is changing dynamics of tectonosphere (lithosphere + asthenosphere) and the controlling convective regime of the mantle.

However, periodic emplacement and collapse of Pangea and variations in the convection regime suggest that the general trend of the Earth evolution is superimposed by certain cycles. These large-scale cycles, megacycles, have a period of the order of 400-500 Ma. As the collapse of Pangea was concurrent with the opening of the secondary oceans: Atlantic, Indian, Arctic, Mediterranean, and their antecedents, and regeneration of the supercontinent brings about closing of those oceans and, consequently, expansion of the primary ocean and its transformation into Panthalassa, these megacycles might be identified with cycles named «Wilson cycles» after J.T. Wilson, Canadian geophysicist, who discovered them following the example of recurrent closing and opening of the Atlantic Ocean.

Many researchers (obviously, beginning with D.Anderson, 1982) believed that a relatively short existence and inevitable collapse of supercontinents are caused by accumulation of mantle heat under their thick extended crust and lithosphere. At first, it produced uplifting of the supercontinent surface, then its splitting by continental rifts, accompanied by activity of plumes and outflow of plateau basalts and subsequent transition of rifting into spreading with formation of «lesser» oceanic basins of the Red sea type, and, later on, real oceans of the Atlantic type. Dissection of the supercontinent by numerous spreading axes means a return to the multicellular structure of mantle convection and increasing release of mantle heat accompanied by the mantle cooling in the area of the former supercontinent. Consequently, heat flow becomes predominant in the oceanic hemisphere of Earth, which, in the end, leads to the Wilson cycle recurrence.

Megacycles form the basis for longer-period fluctuations of sea-level and global climate. In particular, temporal distribution of the glacial periods is in agreement with megacycles. Megacycles also control broad-scale climate change on Earth, favoring circulations of the World Ocean (in epochs of existence of supercontinent and low ocean level) or reducing them (in epochs of supercontinent splitting and high ocean level).

In addition to megacycles, there occurred periodic changes of higher orders in the Earth history. Cycles of subsequent scale, of the order of 150-200 mln, are named by V.E. Khain after M. Bertrand, French geologist, who discovered similar cycles (Khain, 1992). At the latest XIX century he distinguished them on the basis of recurrence of the same succession of sedimentary formations: schistose, flysch, malassic in the section of non-coeval fold systems of Western Europe and North America. He identified 4 cycles: Huronian, Caledonian, Hercynian, and Alpine. Three of them are widely recognized in

the literature, being supplemented by a Cimmerian cycle recorded in the Mesozoic. As for the Huronian cycle, N.S. Shatsky replaced it with the Baikalian.

The Bertrand cycles are reflected in the transgressive-regressive system of cycles, in periodic alterations in the intensity of island arc volcanism, granite formation, and regional metamorphism, revealed on a half-quantity basis by V.E. Khain and K.B. Seslavinsky (Khain and Seslavinsky, 1991).

Bertrand cycles, in their turn, are composed of a series of cycles of shorter duration. Their culminations were marked by orogenic phases, in periods of intensification of fold-thrust deformations. These cycles also coincided with periodic changes in the intensity of tectonic disturbances, island arc volcanism, granite formation, and regional metamorphism, established by K.B. Seslavinsky and V.E. Khain. These processes also correspond to second order cycles of the sea level fluctuations presented on the well-known Vail curve (Vail et al., 1977).

The duration of these cycles, which were named Stille cycles, was dated to be 30 Ma. Hence, the Bertrand cycle is supposed to include four Stille cycles. This periodicity is similar to that established for great extinctions and fauna regeneration, in their turn, related, on the one hand, to large-scale transgressions and regressions and, on the other, to increased bombardment of Earth with large meteorites and (or) comets.

Cycles of next order, 3-5 Ma, are most clearly observed in the stages of the global Phanerozoic stratigraphic scale; they definitely served as an empiric basis for the elaboration of the scale. On the afore-mentioned Vail curve indicating eustatic sea-level fluctuations, the given cycles correspond to those of the third order.

Next is the periodicity level established by M. Milankovitch, who successfully used it for the explanation of the alternation of Quaternary glacial and interglacial epochs. Recent data (Berger et al., 1989) suggest that cycles, 400 and 100 ka long are characteristic of changes in the eccentricity of the Earth orbit; 41 ka, of changes in the inclination of the Earth rotation axis; and 23 and 19 ka, of precession. These cycles are also reflected in the change of lithology and thickness of extraglacial deposits, in particular, in the changed CaCO_3 content and organic carbon. Cycles with a duration period of 400 ka are well identified in coal-bearing and saliferous formations, and, lately, Milankovitch cycles, 1.2 Ma long, similar to third order Vail cycles, were revealed in the core of a deep drilling borehole in the Atlantic Ocean (Pelike et al., 2006).

It was even proposed to use a cycle of 20 ka years as a climatostratigraphic unit of climate change and to name it Gilbert (Dercourt et al., 1986).

Still shorter cycles were named by S.L. Afanas'ev nannocycles. He devoted many years of his professional life to studying cycles in geological processes. S.L. Afanas'ev identified cycles of the following duration: 452, 109, 88, 31, and 9 years and presented evidence confirming their existence. These data include climatic fluctuations, changes in the day and night duration, i.e., in the rate of Earth rotation, changes in seismic activity, solar energy, ocean level and lake level fluctuations, thickness of lacustrine deposits etc. In the latest decades the authors of this monograph and some other scientists

have revealed a definite periodicity of volcanic eruptions, terrestrial and submarine. According to S.L. Afanas'ev, nannocycles result from the Moon and Sun effects, periodicity of eclipses, and Earth's passing through perihelion. Other investigators (Khain V.E., Mekphtiev Sh.F., Khalilov E.N., Ismail-Zade T.A. and others) suggest that cycles of volcanic and seismic activity correlate with 11- and 22-year solar energy cycles.

Methodologically important is to take into consideration monotonous and periodical components of the geological development of Earth. Particular attention is needed in application of the actualism method that is important virtually for all earth sciences. First, the farther away, in terms of geological time, are the objects and processes under study from the recent epoch, the more probable are their distinction from present-day analogues. Incidentally, those processes were so slow that in the last billion years they might be ignored, though for earlier periods, particularly, beginning with the Proterozoic-Archean boundary, they must have been taken into account.

We should also take into consideration (and it bears relation to the Phanerozoic) cycles of changes in the geological environment, and processes going on in it. Moreover, we live at the time of significant climatic contrasts, in the glacial, or more precisely, interglacial period. Therefore, we can not refer to recent processes as complete analogues of those, which occurred in epochs, when climatic zones on Earth were not so clearly identified, when there were no glacial caps, the circulation in the oceans was not so intense, and, in general, ocean-atmosphere exchanges were quite different (Nance et al., 1988).

Cycles in recent volcanism and seismicity

Earthquakes and volcanic eruptions are highly sensitive indicators of increasing tectonic activity. In the early 1950s, it was recorded that a total energy of the elastic deformation released during a year in the form of seismic waves on the entire Earth varies within a broad range, 40-50 times (Gutenberg and Richter, 1954). Periods of increasing seismic activity are replaced by periods of its decline. Thus, H. Benioff arrived at a conclusion that strong shallow earthquakes occurring in various parts of the Globe are not independent events, but they are connected with the planetary-wide system of alternated declining and increasing elastic strain.

Exploring a total energy of deep earthquakes occurring at a depth of 70 to 700 km, B. Gutenberg arrived to the conclusion that strong deep earthquakes belong to a single stress system, in which, during compression, elastic deformations are accumulated or released. In view of this, all volcanoes and earthquakes were divided into four geodynamic types: Earth compression belts («C» type); oceanic rift types («OR» type); continental rift types («CR» type); oceanic intraplate type («O1» type). Mud volcanoes formed a separate group («M» type). While investigating planet-wide processes of lithosphere extension, the «OR» and «CR» types were united to form a single type: Earth extension belts («E» type).

The detailed analysis of high-frequency components of the spectra of time rows of volcanic eruptions and earthquakes, which were also calculated using filters of different length, has shown:

1. The identified high-frequency harmonics (with $T < 20$ years) are less stable, when the length of the filter is changed, as compared with low-frequency harmonics (with $T > 20$ years), revealed and described in the book

2. Most stable high-frequency components of the spectra are harmonics with $T \sim 22$ -24 years and $T \sim 10$ -12 years.

3. Studies of the spectra, showing temporal distribution of volcanic eruptions, have indicated:

a) High-frequency components of volcanic eruptions of the «C», «E», and «M» types are alike, being also similar to the Wolf numbers spectrum, the periods of harmonics in various spectra differing, by no more than a year;

b) Harmonics with $T = 22$ years is identified in all the spectra of volcanic eruptions and Wolf numbers.

5. Studies of the spectra of earthquake distribution in time have shown:

a) In the spectra of strong (with $M > 7$) and weak (with $M < 7$) earthquakes, only harmonic with $T \sim 20$ -23 years, are always identified;

b) In the spectra of earthquakes with $M > 7$ and Wolf numbers, harmonics similar to $T \sim 10$ -11 years and with $T \sim 8$ years are revealed;

c) Spectroscopy of time rows of weak earthquakes suggested that the spectra of the earthquakes of the «C» and «01» types are alike. These results are consistent with the revealed regularities in volcanic eruptions, particularly, in low-frequency spectra components (with $T > 20$ years);

d) The spectra of time rows of weak earthquakes contain harmonics with periods, characteristic of the solar energy spectrum: $T = 22$ -24 years, $T \sim 12$ -14 years, $T \sim 10$ -12 years, and $T \sim 5$ years.

The conducted research has made quite evident the effects of the 11-year and 22-year cycles of the solar activity on the Earth recent tectonic activity, which is reflected in volcanic eruptions and earthquakes.

Effects of the solar energy on seismic and volcanic activity, drift of the geomagnetic poles

Involving different correlation methods, the monograph shows that the solar energy could influence geodynamic processes, in particular, volcanic and seismic activities. The periods of increased solar activity are accompanied by growing activity of volcanoes and earthquakes intensifies in the Earth compression belts (in zones of subduction and collision of lithospheric plates), whereas in extension areas of the Earth (in rift zones), the seismic and volcanic activity declines to the minimum. This fact suggests variable influence of the solar energy on geodynamic processes and at the same time confirms possibility of periodic change of the Earth radius.

The most precise model of the origin of sunspots was developed in 2004 by a group of scientists at the head of Doctor Mausumi Dikpati from the National Center for Atmospheric Research of the USA (NCAR).

In the early 2006, investigators calculated the 24th cycle of the solar activity; its peak is supposed to be reached in 2012. The 24th cycle of the solar activity is predicted to be 1.5 times as high as the preceding 23rd.

Meanwhile, not only the peak of the 24th, extremely powerful 11-year cycle of the solar activity is expected in 2012, but the peak of the fourth 75-85-year cycle as well. This cycle is shown as the contour of the maxima of 11-year cycles of the solar activity. The maximum of another, greater, presumably, 300-year cycle of the solar activity is also supposed to be reached at that period.

Thus, the maximum of the increased solar activity cycle is expected in 2012. Meanwhile, the maxima of volcanic and seismic activity cycles in the Earth compression belts will fall within 2012-2015, involving the earlier observed retardation of the 11-year cycles of the volcanic and seismic activity with respect to those of the solar activity. A longer duration of the maximum values of volcanic and seismic activity (4 years) as compared with the solar activity is due, on the one hand, to certain inertness of geodynamic processes, and, on the other, apart from the solar activity, to effects of quite a number of other factors, both of endogenic and cosmic character. An attempt was made to provide a long-term forecasting of volcanic and seismic activity in the Earth compression belts up to 2020.

The problem of drift of the Earth geomagnetic poles was discussed, the results of explorations in that field, which were carried out by various science centers were presented; further developments in the field were proposed.

The magnetic field of Earth is an integral physical characteristic of our planet, which reflects complex energy processes going on in the internal and external nucleus. It is considered that the Earth's magnetic field was originated as a result of flowing of great masses of fluid iron, which make up the Earth external nucleus, around the Earth internal nucleus.

The role of the geomagnetic field in the development and maintenance of life on Earth is very significant, as lines of force of the Earth's magnetic field create around the planet a peculiar magnetic screen, which defends the Earth's surface from cosmic rays being harmful for all living organisms, and from flows of charged particles of high energy.

Shifts of the magnetic poles have been registered since 1885. Over the last 100 years, the magnetic pole in the southern hemisphere was shifted for nearly 900 km and entered into the Indian Ocean. Latest data on the Arctic magnetic pole (moving towards the East Siberian world magnetic anomaly through the Arctic Ocean) indicate that from 1973 to 1984, the northern geomagnetic pole was shifted for 120 km and from 1984 to 1994, for more than for 150 km. By the beginning of 2002, the speed of drift of the northern magnetic pole increased from 10 km/year in the 1970s, to 40 km/year in 2001.

An important factor to be taken into account is an increase of the angle of solution of casps (polar gaps in the magnetosphere in the north and south), which by the mid 1990s reached 45°. Radiation matter of the solar wind and interplanetary space moved into the widened gaps, i.e., great amounts of extra substance and energy started to get into polar areas, so «warming» polar caps.

In the past, there were repeated inversions of the magnetic poles occurred, and life was conserved. The point is which forms of life can be preserved and what mutations they will undergo. If, as some hypotheses suggest, during the polar inversion, the magnetosphere of the Earth disappears for a certain period of time, then cosmic rays will affect the Earth that might present a real danger for inhabitants of the planet, particularly, if magnetosphere disappearance is related to depletion of the ozone layer.

Inversion of poles takes place, approximately, every 500 thou. years. However, the present period of their arrangement delayed: they have not exchanged places for over 750 thousand years.

In 2007 after the analysis of latest evidence, obtained from the satellite, which monitored magnetic field of the Earth, the Center of Cosmic Research of Denmark made quite unfavorable conclusion. Danish scientists consider that the Earth's geomagnetic field is at a stage of approaching the inversion of the magnetic poles, and it may occur much earlier than expected. These data are partly consistent with the results of the IZMIRAN investigations.

What else can be expected from the continuing and accelerating shift of the magnetic poles? Regarding that this process is accompanied by a decrease in the intensity in the Earth's magnetic field, we have every reason to suggest that it should affect global climate change. Weakening of the geomagnetic field will bring to the collapse of the ozone layer and increased penetration of electromagnetic radiation into the atmosphere, particularly in the ultraviolet spectrum, as well as flows of charged particles of high energy. Respective changes will certainly take place in the ionosphere. All these physical consequences of a decrease in the Earth's magnetic field intensity might cause redistribution of atmospheric flows and cyclones, followed by global climate change.

It is difficult to forecast further developments concerned with further movement of the geomagnetic poles and let us hope that this process will not be very fast advancing.

Variations of measured values of the gravitational constant G and their possible interpretation

One of the conclusions made of the current work is that variations of the gravitational constant measured by different researchers over many years did not result from incorrect measurements or device errors. Variations of G values measured in leading scientific centers in different countries, approximately two-three orders exceed the errors of modern devices intended for measuring the gravitational constant.

At the same time, monitoring of the G values, carried out over 16 years by Russian scientists O.V. Karagioz and V.R. Izmailov, indicates that the temporal G variations have statistically true wave character.

A significant aspect, outlined in our monograph is discrepancy in the physical essence between wave and cycle processes. Therefore we need to apply different approaches while analyzing and assessing cycle and wave processes.

The main difference between the wave and cycle process is that in the wave process, the semiwave negative part bears the energy equal to that which is contained in the positive part, though opposite in sign. At the same time, in cyclic processes minimum values reflect the least emission of energy, and maximum values, the greatest emission of energy. This should be taken into consideration, when the cause-effect relations are to be established, and when the correlation analysis of cycle and wave processes is performed.

As a result of the research the authors suggested that variations of the measured G values, registered by scientists of different countries, represent a wave process and can be viewed both as consequences of the influence of the geodynamic processes on readings of the Cavendish balance and as a result of passing of superlong gravitational waves (SGW) through the Earth.

It has been shown that when SGW pass through the Earth, the values of the gravitational constant, registered in diverse points of the globe, must differ from one another, depending on the Cavendish balance orientation relative to the direction of SGW spreading. Equal G values, registered simultaneously in various points of the globe, can be obtained only in one case: in the moment of exchange of SGW semiwaves.

Multiyear G variations

1. The analysis of variations of the G values, measured from 1985 to 2000, has shown that they reflect wave change G , resulting from the superposition of superlong gravitational waves of three orders: periods of 40-60 years, 7.7 years, and 2-2.5 years.

SGW passing produces quadrupole deformation of the Earth, which was confirmed by the recent discovery made by Christopher Cox from

Raytheon Research Company and by Benjamin Chao from NASA Center in Maryland on the basis of studying long-term variations of the zonal coefficient of the second degree spherical harmonics of the Earth, the so-called coefficient J_3 . With a help of satellites and laser measurement they revealed a quadrupole change in the Earth's shape and dimensions, decrease in its radius at the poles and its increase along the equator. Only these changes in the shape and dimensions of the Earth are possible, when the gravitational wave is passing through it.

2. Studies of the correlative relations between variations of the measured G values and different geodynamic factors, from 1985 to 2000, allowed establish correlative

links between SGW, seismic, and volcanic activity of the Earth, and change in the angular rate of its rotation.

3. Analysis of space-time change in the integral strain axis of the Earth has shown that they reflect the quadrupole character of deformation processes in the Earth, which is in full agreement with the presented-by-the-authors the model of the Earth's geodynamics reaction to passing of SGW.

4. The authors believe that the passing through the Earth of superlong gravitational waves greatly affects the formation of the main cycles of the geodynamic activity on the planet. Moreover, passing through our planet of gravitational waves of different frequencies and in directions must produce a complex interference picture that must also be reflected in natural processes.

5. A new mechanism of the influence of superlong gravitational waves on geodynamic processes and deformation of the Earth has been proposed. A superlong gravitational wave, passing through the Earth, creates, in every point of space, energy-spatial priority (ESP) for distribution of energy flows of the atmosphere, hydrosphere, and lithosphere of the Earth. ESP is formed by strain tensor in the SGW gravitational field in every space point in each particular moment.

In fact the gravitational wave spatially redistributes energy flow in the Earth and Earth-related space, spending considerably less energy as compared with the gained effect. In physics there are numerous analogues, widely used in electronics, hydrodynamics, and other spheres for controlling and redistribution of the electromagnetic and other kinds of energy.

Effects of planets of the Solar system on geodynamic processes

The effects produced by the gravitational fields of planets of the Solar system on geodynamic and atmospheric processes of the Earth were demonstrated with Mars and the Moon taken as examples. The conducted research shows that the period of the Mars-Earth Great Opposition, which occurred on August 28, 2003, was marked by a clearly distinguished anomalously high activity of both atmospheric and geological cataclysms. The activity of the atmospheric (typhoons, hurricanes) and geological (earthquakes, volcanic eruptions) events of the planet's energy, from July to October 2003 was 2.5-3 times as high as the phone values. The authors emphasized that first activation of atmospheric processes is recorded and further, when their activity decreases, the activation of geodynamic processes starts in the Earth lithosphere.

Approaching of Mars to Earth is not an instantaneous action, but a progressive process, therefore, its gravitational effect on the Earth also increases gradually. If Mars approached the Earth 7-fold, then proceeding from the law of universal gravitation, the gravitational force of Mars, affecting the Earth, had become during that period 49 times as great.

What processes are accompanying these phenomena? The fact is that unlike the magnetic and electric fields, the gravity field affects bodies and space unusually, i.e., as

Mars approaches the Earth, the shape of the latter changes: the Earth elongates at the opposite sides, along the line connecting the Earth and Mars centers and contracts in the perpendicular direction.

However, in addition to the solid component of the Earth, this process also affects the atmosphere and hydrosphere (World Ocean). And the atmosphere, being less dense, more mobile and responsive to outer effects, reacts much earlier to the approach of Mars. Therefore, atmospheric anomalies, such as typhoons and hurricanes, manifested themselves much earlier, as far back as July 2003. The Mars gravity field upset the existing balance in the atmospheric circulation. Moreover, if we could observe the Earth atmosphere from Cosmos, we would be able to observe to what extent its shape was deformed under the influence of the Mars gravity field.

The Earth's crust is a solid substance, and the processes going on in it, are more inert. The gravity field of Mars brought about redistribution of energy in the Earth's crust and broke the geodynamic balance, supplying its appreciable share of energy to the common "energy repository." This upset the balance in the earthquake centers, the strain in which was at a critical level. At any case, average monthly forecast of the seismic activity, performed by the Research Institute on Forecasting and Studying of Earthquakes, predicted that next three-month cycle of seismic activity was expected to start in October 2003. Nevertheless, the situation on Mars, on the one hand, accelerated the cycle and, on the other, made much greater its amplitude.

Thus, taken the Moon and Mars as examples, we have estimated possible influence of the gravity field of planets of the Solar system on climatic and geodynamic processes and have arrived at the following conclusions.

The formation of the atmospheric and geodynamic regimes of the planet was most affected by the gravity field of the Moon. At the same time, in terms of energy exchange, the Earth-Moon gravitational interaction is a single system that develops natural rhythms of climatic and geodynamic processes. The influence of the Earth on the Moon and vice versa the influence of the Moon on the Earth should be viewed as a coexistence of two elements of a single system. Therefore, mutual deformations of the Earth and the Moon affected by tidal force, which generate cycles in atmospheric and seismic processes, are as natural as change of day-and night or seasons.

The calculations indicate that taking into account instant emission of energy, the approaching of Mars is not an outstanding event. But taking into consideration that this part of the gravitational energy was added to the general energy of the Earth in the course of several months (Mars approaching and moving away), the added part of the energy grows, exceeding the energy supplied by the Moon during tides, i.e. if the Moon tides do not supply additional energy to the Earth-Moon system, then the Mars tide lasting for several months, adds appreciable portion of additional energy to the Earth-Moon system.

This process can be regarded as a peculiar "injection" into the atmosphere and solid Earth of gravitational energy, supplied by Mars, which might disturb the energy balance in the Sun-Earth-Moon system, first of all, the Earth atmospheric circulation,

which, in its turn, upset natural geodynamic processes. This might account for the fact that atmospheric processes start to react to Mars approaching somewhat earlier and then follow geological cataclysms

Basically, the Mars-Earth gravitational interactions like those of other planets, in the periods of great oppositions, appear as one of the elements of the Solar system functioning. These processes occur with a certain periodicity, though the period is longer than the human life span, and, hence, they are regarded as artifacts. If moon tides in the ocean had occurred with a periodicity of 50 or 100 years, they would be viewed as global natural hazards, which are accompanied by flooding of vast land areas. But nobody is threatened by oceanic floods, which are regarded as natural events of our life.

Therefore, when we explore natural hazards, an important factor is psychological perception of natural phenomena in relation to human activities.

For example, if the process of flooding is lengthy as compared with human life span, it won't be viewed as a natural hazard, though its scope can be much greater than in case of rapid flooding. At the same time, from the point of view of geology, the process of long-lasting flooding, of a larger proportion, might be considered as a world-wide natural hazard.

Non-tide gravity variations and their possible nature

Occurrence of cycle in the Earth gravity field in the course of geophysical exploration of non-tide gravity variations has given interesting conclusions. Using "Binagadi" station (Apsheron peninsula), which has monitored the gravity over the latest several years, we have established appreciable non-tide gravity anomalies (0.5-1.5 mGal), being generated 1-3 weeks before strong distant earthquakes. An uncommon aspect of this phenomenon is the distance separating the recording station from the centers of eventual earthquakes, which in some cases exceed 10 thousand kilometers. Statistical truth of the obtained results was confirmed by non-stop observation with the «Binagadi» station from January 2004 to May 2008 (at present observations are continuing). The «Binagadi» station registers the gravitational prediction in the 90% of cases before strong distant earthquakes in the eastern hemisphere, with a magnitude >6.5. The authors made an attempt to explain this fact, and, in particular, by passing under the «Binagadi» station of tectonic waves prior to strong distant earthquakes. Possible sources of tectonic waves were considered.

Attention was attracted to the impact of the gravity field of planets of the Solar system on seismic and volcanic events; some calculations were done, and possible mechanism of that influence was put forward.

Global climate change and geodynamic processes

In the latest years, the attention was focused on the problem of global climate change. UN special expert service arrived to the conclusion that over the last two

centuries, technogenic human activity was the main cause of global climate change. But is it in fact the only cause of global warming?

Writing this chapter we didn't intend to start dispute with UN expert structures over the conclusion they have made. Our purpose is to show that despite the significance of the problem of harmful impact of human activity on the natural environment, and, in particular, on global climate change, the role of endogenic processes that notably affect world-wide climate change is no less important. Summing up the multiyear research work on space-time volcanic and seismic activity on Earth, we still suggest that global climate change observed at present, global warming in particular, is a result of increased activity of volcanoes in Earth compression belts, which preserved this tendency during the latest 200 years.

We used the materials provided by the latest report (2007) of the Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC).

However, according to IPCC, the major impact produced on climate by humans is rather due to release of greenhouse gases: CO_2 , CH_4 , N_2O , and Freon, than to release of aerosols. CO_2 concentration in the atmosphere was meticulously controlled over many years by the Mauna Loa observatory (Hawaiian Islands) and at the South Pole. Recently methane concentration in the atmosphere is 1.7 ppm and 2.5 as great as the maximum, revealed by the core at the Vostok station (IPCC, 2007).

At the same time, CO_2 together with other gases is emanated in great amounts during eruption of volcanoes. To make clear the possible effects of the cycles of volcanic eruptions on global climate warming, we have compared the diagrams of average temperature change on Earth with those of average number of eruptions of volcanoes in the Earth compression belts from 1850 to 2000s.

As was reported in preceding chapters, about 90% of the energy share and discharge into the atmosphere are released during eruptions of volcanoes of subduction zones.

Comparison of the diagrams has shown similarities of in the nature of temporal change in both in average annual temperature and in volcanic activity. Both diagrams can be conventionally subdivided into three intervals: 1850-1915; 1916-1965; and 1966-2000. Each interval is characterized by a sharp increase in the temperature and volcanic activity, in 1915 and in 1965. It is to be noted that in the first interval, three activation cycles are identified on both diagrams; in the second interval, two cycles; and, at the third one, again two incomplete cycles.

A noteworthy factor is delay of the cycles of temperature increase in relation to cycles of volcanic activity intensification. In the preceding chapters, we paid special attention to clarifying the causes of delay of certain cycles compared with others. The delay stems from the cause-effect relations between these two processes. It should be mentioned that when we discussed the causes of the delay in volcanic activity with respect to solar activity, we also involved the cause-effect principle. It is the intensification of solar activity that brings about an increase in volcanic activity; the latter is its inevitable consequence, not vice versa.

We apply the same principle to clarify the cause-effect relations between the change in the number of volcanic eruptions, which is the causes of Earth temperature changes with those which are their consequences.

Concerning the mechanism of the cause-effect relations between volcanic activity and change in the Earth temperature. An increase in the number of volcanic eruptions leads to an increased arrival of volcanic gases, CO_2 in particular, into the atmosphere, so intensifying the greenhouse effect and, as a consequence, causing an increase in the temperature of the atmosphere. From 1860 to 2000 the number of volcanic eruptions grew by 80%.

Judging by the diagrams, an increase in the number of volcanic eruptions, by 5 eruptions per year on the average, corresponds to the temperature increase by

0.4°C . Close similarity between the diagrams of global temperature change on our planet and the volcanic activity on Earth can be logically substantiated in terms of physical aspects. Double increase in the annual average number of volcanic eruptions is supposed to bring a double increase of gases arriving into the atmosphere during volcanic eruptions and, first of all, CO_2 which plays the leading role in the formation of the greenhouse effect and stimulates a rise in the average annual temperature on Earth.

On the basis of the established correlation features and applying the principle of cause-effect relations among different natural processes, we attempted a long-range forecasting of the change in the volcanic activity in Earth compression belts and of global changes in the average temperature on our planet until 2060. In plotting forecasting data on the diagram, we took into account the period of delay in the maxima of average temperature increase on Earth relative to the maxima of volcanic activity, as well as the ratio of the amplitudes of cycles of increase in the average temperature on Earth relative to cycles of increased volcanic activity. Future will show whether our hypothesis and conclusion are correct.

Unity and harmony

Summing up our research activities and considerations, we should note that in this paper we have considered but a small share of factors and processes, which influence the creation of cycles in geodynamic processes. We would like to systematize and unite in a single model all mentioned factors and processes, which is rather difficult to do lexically but we might try to represent them accompanying with schematic images.

In order to start the development of the model, we should first turn to the time of the origin of the Universe, i.e., the initial starting point, the moment of the Great explosion.

The concept of «cosmological singularity» was introduced to describe the starting moment of this process.

Cosmological singularity is the state of the Universe at the initial moment of the Great Explosion, which is characterized by infinite density and temperature of the matter. Cosmological singularity is one of the instances of gravitational singularities, predicted by the general relativity theory and some other gravitation theories. Generation of this singularity, while tracing back in time any GRT decision, was definitely proved in 1967 by Stephen Hawking.

Hence the Great Explosion provided the first impulse towards the origin of the largest cycle in the evolution of the Universe. The Explosion was accompanied by emanation of energy and matter into space, and this outburst gave rise to energy radiation in the giant spectrum of frequencies.

What forms a wave period, bearing energy, whether electromagnetic or gravitational? It is well-known from physics that the radiated wavelength will be proportionate to the linear parameters of the radiating system (antenna). Without dwelling on the methods of calculating the ratio of linear dimensions of the radiating/receiving antennas and the length of radiated/received electromagnetic waves, which have been well-studied and adequately described in the literature on electrodynamics, we would like to note that the linear dimension of the antenna should be no less than 0.4 of the length of the radiated/received wave. This ratio is retained in gravitational waves.

Thus, at the moment of the Great Explosion, much energy was released into space, in the form of gravitational waves, which presumably are still spread in the Universe as relict radiation. But the situation is more complicated. The point is that a spherical area can not radiate gravitational waves. As reported in one of the published Einstein papers (1918), dealing with the nature of gravitational waves "... the mechanical system, retaining its spherical symmetry, can not radiate."

Meanwhile, latest astrophysical observations suggest that the form of the Universe is far from being spherical, it is intensely flattened, and, consequently, at the moment of the Great Explosion the conditions were favorable for energy radiation in the form of gravitational waves.

The initial results obtained by the WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) Cosmic Observatory, where intensity of relict radiation was measured, were published in January 2003. They provide so much long-awaited information, that up to now it has not yet been completely studied.

The data obtained by the cosmic radio-observatory allowed define with unprecedented accuracy numerous cosmological parameters. First, the relation of full density of the Universe to critical is 1.02 ± 0.02 (i.e. our Universe is flat or closed being slightly curved). Secondly, the Hubble constant characterizing the large-scale expansion of our planet, 72 ± 2 km/sec/Mpk. Thirdly, the age of the Universe is 13.4 ± 0.3 Ga, and the red shift, which corresponds to the recombination time, 1088 ± 2 is the mean value; the thickness of the recombination boundary is much greater than the indicated error/ (<http://galspace.spb.ru/index77.html>).

Therefore, gravitational waves of maximum length and energy (amplitude) could have been formed only at the moment of the Great Explosion. These waves passing

through cosmic space, and naturally through Earth, can effect the formation of larger-scale cycles of geodynamic activity.

The greater are the linear dimensions of the radiating system, the larger cycles it generates

Smaller-scale processes, such as merging of black holes, explosions of supernova, etc., can produce gravitational waves of much smaller length in cosmic space, and their passing through Earth will favor the formation of cycles of shorter periods.

As afore-mentioned, the formation of geodynamic activity cycles depends on numerous factors, both endogenic and exogenic. The formation of cycles in many processes, both in the Earth geosphere and biosphere is to a great extent affected by the solar activity with its major cycles, lasting on the average: 11 years, 22 years, and 75-80 years. The orbital revolution of any cosmic body is a cyclic process, evoking cyclicity, which corresponds to the rotation period. Hence, the rotation of the Solar system on the galactic orbit gives rise to a «Galactic cycle»" Similarly, corresponding cycles stimulate movement of the Earth around the Sun, the Earth orbital rotation, rotation of the Moon around Earth, change in the position of the planets of the Solar system in relation to Earth etc. We can ad infinitum be involved in studying any cyclic processes, which are a great many in nature. However, there are definite global laws, which guide the creation of cycles in geodynamic processes. The basic principle here is "hierarchy"; this term does not imply any relations among various cycles, as it recognized by some researchers, though the latter version is not ruled out either. The concept «hierarchy» includes the invariance principle and influence of one process on another directed from top downward, in terms of scope. Recognizing that the philosophical concept, saying that any event occurring in any point of the Universe is somehow reflected in all its other points of the space, we, nevertheless, should admit that Universe-wide events exert greater influence on all elements of the Universe (galaxies, stellar spheroidal and dust formations, stars, black holes, planets, etc.) than events related to isolated element of the Universe. Hierarchy in terms of proportions and direction is one of the basic principles of natural relations, and it is closely associated with the cause-effect relations principle. We have discussed this point of view in the chapter devoted to cause-effect relations in geology, and we would like to mention once again that the effect of the solar activity on Earth is much greater than that of the seismic and volcanic activity on processes going on in the Sun.

Fig. 155 shows hierarchy of cause-effect relations between Earth and Cosmos, depending on the cosmic factor, affecting the Earth.

Fig. 155. Hierarchy of cause-effect relations.

Arrow indicates the direction in the hierarchy of influence of cosmic processes on Earth.

On the figure:

1. Universe; 2. Galaxy; 3. Solar system; 4. Earth

Hence, taking into account our conclusions, we can suggest that the waves, the length of which is commensurable with Earth dimension, have the largest period in the Universe. But what is its real dimension?

The initial point of a light particle, photon, which reached us today and had been en route for 13.7 billion years, is now at a distance of 78 billion light years from us. This is what makes up the radius of the Universe.

This estimation was obtained after the analysis of the data with space probe designed to study WMAP microwave anisotropy, which was applied for studying relict radiation, generated approximately 400 thousand years after the Great Explosion (http://news.bbc.co.uk/1/hi/Russian/sci/tech/newsid_3758000/3758599.stm).

Provided the geodynamic cycle was formed by outer impact of wavy character, for instance, as a result of passing through Earth of superlong gravitational waves, the cycle period will depend upon the wavelength, and, consequently, upon the linear dimension of the source of gravitational radiation. Fig. 156 shows schematically the dependence of the length of radiated waves or periods of cycles they generate upon the dimension of their source in the Universe. Scale of the scheme is conventional.

Fig. 156. Scheme showing dependence of wave periods upon the linear dimensions of a radiation source in the Universe (Scale is conventional).

L - linear dimensions of the radiation source (in billion light years).

T - period of a radiated wave

On the picture:

1. billion light years; 2. billion years; 3. period

As inferred from the scheme, the larger are the linear dimensions of systems, the longer are the periods of cycles they form.

In their paper V.E. Khain and M.A. Goncharova (Khain and Goncharova, 2006) carried out a detailed comparison of earlier advanced ideas about the hierarchical geodynamic cycles and the geodynamics of hierarchically coordinated geospheres. Definite relations were established between the periods (ranks) of cycles and the proportions of systems, generating them.

If the moment of the Great Explosion, embracing the first 400 thousand years of the Universe existence, is regarded as a starting point, then the radius of the radiated system (radius of the Universe) at the initial moment, as was described above, will be 13.7 billion light years.

On the basis of these values we can try to find out the dependence of the period of the cyclicity formed in the Universe or radiated waves upon the linear dimensions of the cosmic system under consideration.

Fig. 157 presents the diagram showing dependence of the period of a cycle being generated (radiated wave) on the radius of the radiation system.

Fig. 157. Diagram showing dependence of the period of the generated cycle (radiated wave) upon the radius of the radiating system (Khain V.E. and Khalilov E.N., 2008)

On the picture:

1. L, billion light years; 2. billion years; 3. period.

Thus, we put forward the principle of invariance of a cyclic period and linear dimensions of the system forming it, Khain-Khalilov principle. Below, we present our interpretation of this principle.

The period of cycles generated by the system is directly proportional to the linear dimensions of the given system.

For the mathematical representation of this regularity, we propose to introduce a cyclic invariance coefficient:

$$K = T/L,$$

where K is the coefficient of the cyclic invariance (Khain-Khalilov constant); T is period of the generated cycle; L denotes the linear dimension of the generating system.

Considering the Universe and cyclic periods it develops as the initial reference system, we can calculate the coefficient of cyclic invariance:

$$K = 13.7/13.4 = 1.02$$

Thus, the coefficient of cyclic invariance is 1.02, i.e., it approximately equals one (1). On the basis of this ratio, we can calculate the periods of cycles, generated by diverse systems, both on Earth and in Cosmos (galaxies, stellar systems, spherical formations, stars, etc.).

However, while studying cycles and causes of their formation, researchers face serious problems, which frequently lead them astray. In some cases, two processes with identical cyclicity and being highly correlative, might not at all be related to each other, though they can be associated with a third factor, of a higher rank, which effects both of them. For instance, 11-year wheat harvest cycle is not at all related to the 11-year cycle of seismic activity, though both processes are directly related to the influence of solar activity. The point is that superimposing of cycles of different scales can give rise to the appearance of quite new cycles with new parameters, while the carrier frequencies that have developed these new cycles might be virtually invisible at the time interval under study. Let's illustrate it by an example.

Take an ordinary cycle 1 on Fig. 158 and superimpose by turns cycles with different periods. The obtained picture can be seen in Fig. 158.

Fig. 158. Result of cycles with different frequencies superimposed on Cycle 1

On the picture

1. period

If a scientist is exploring results of superposition of two ordinary cycles (two sinusoids), then while investigating resulting cycles E and D, he could distinguish a certain trend, whereas studying resulting cycles A, B, and C, it is quite difficult to make out superposition of two cycles. If we take into consideration that superimposed cycles are far from being ideal sinusoids and they themselves can present a result of superimposing of other cycles, it becomes clear that establishing cause-effect relations among diverse cyclic processes is a very difficult task.

Another factor minimizing possible errors in assessing mutual influence of cycles of two or more processes might be direct instrumental measurements, for instance, the measurements of global variations in the gravitational field, or theoretical research substantiating the interactions of the given processes. In the second case we could refer to such directly or indirectly interrelated cyclic processes as motion of the Moon around the Earth, which provokes tides in solid Earth and which are registered with the help of gravimeters, change of day and night, or seasons, etc. Among indirectly related processes are those observed and recorded by A.L. Chizhevskii: effects of the solar energy on various processes in the biosphere, such as frequency of epidemic of different diseases, atmospheric anomalies etc. which can be explained by a chain of interrelated physical-chemical processes.

We began to describe our current research work with the words by Albert Einstein, and would like to end it with the words by Max Planck:

«Indeed, how pitiful and weak we must seem to ourselves, if we bring to mind that Earth, on which we live, is but a tiny dust particle in a virtually infinite cosmic space, i.e., indeed nothing, and, on the other hand, how strange it should seem to us that we, tiny creatures on some small planet, manage to get to know, though not the essence, but, at least, presence and dimension of elementary bricks of the entire universe» (*Report delivered in May 1937, in Derpt (Tartu) University.. Max Planck, Religion und Naturwissenschaft. Vortrag gehalten im Baltikum (Mai 1937) von Dr. Max Planck. 2te unverand. Auflage. Joh. Ambrosius Barth Verl. Leipzig, 1938*).

Undoubtedly, the conclusions of the authors are not indisputable and may undergo modifications or supplemented in the course of further research or as a result of investigations carried out by other scientists. Nevertheless, we hope that the readers will not remain indifferent to this work, which will provide them opportunities for further considerations.

ЛИТЕРАТУРА

- Абакелия М.С.* Об изменениях силы тяжести во времени в связи с геотектоническими движениями на Кавказе // Проблемы советской геологии. 1936. Т.6. №2. С.117-122.
- Абдурахманов А.К., Фирстов Л.П., Широков В.А.* Возможная связь вулканических извержений с одиннадцатилетней цикличностью солнечной активности // Бюллетень вулканических станций. М., 1976. №52. С.3-10.
- Абрамович И.И., Груза В.В., Клушин И.Г., Масайтис В.Л.* и др. Современные идеи теоретической геологии. JL.: Недра, 1984. 280 с.
- Абих Г.В.* О появившемся на Каспийском море острове и материалы к познанию вулканов Каспийской области. Тр. Ин-та геологии. Изд-во АзФАНА, 1939, т. 12.
- Авдусин П.П.* Грязевые вулканы Крымско-Кавказской геологической провинции. Петрографические исследования. М.-Л., АН СССР, 1948.
- Авсюк Ю.Н.* Глобальные изменения среды и климата в сопоставлении с приливной моделью эволюции системы Земля-Луна // Геофизика на рубеже веков. М., 1999. С.93-106.
- Авсюк Ю.Н.* Внеземные факторы, воздействующие на тектогенез // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. С.425-443.
- Адушкин В.В., Ан В.А., Овчинников В.М.* Структурные особенности внутреннего строения Земли по результатам сейсмических наблюдений за подземными ядерными взрывами // Физика Земли. 2000. №12. С.3-26.
- Адушкин В.В., Витязев А.В.* Происхождение и развитие Земли: современный взгляд // Вестник РАН. 2007. №5. С.396-402.
- Адушкин В.В., Гаврилов Б.Г., Горелый К.И.* Геофизические эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Докл. Академии наук. 2007. Т.417. №4. С.535-540.
- Адушкин В.В., Спивак А.А.* Роль тектонических нарушений в межгеосферных взаимодействиях на границе земная кора - атмосфера // Докл. Академии наук. Т.402. №1. С.92-97.
- Азбель И.Я., Толстихин И.Н.* Радиогенные изотопы и эволюция мантии земли, коры и атмосферы. Апатиты: Кол. Фил. АН СССР, 1998. С. 141.
- Акуленко Л.Д., Кумакиев С.А., Марков Ю.Г.* Движение полюса Земли // Докл. Академии наук. 2002. Т.382. №2. С.199-205.

- Акуленко Л.Д., Марков Ю.Г., Перепелкин В.В. Докл. Академии наук. 2007. Т.417. №4. С.483-488.
- Алешкина Е.Ю., Красинский Г.А., Питъева Е.В., Свешников М.Л. Экспериментальная проверка релятивистских эффектов и оценка величины изменения гравитационной постоянной по наблюдениям внутренних планет и Луны. УФН, 1987. С.720-724.
- Амирханов Х.И., Сардаров С.С. Способ прогнозирования землетрясений. А.С. №499543. 15.01.76, Бюллетень № 2.
- Ананьин КВ., Фаддеев А. О. О возможных причинах корреляций между изменениями величин сейсмической активности и средними годовыми температурами на поверхности Земли // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Янус-К, 2002. Т.3. С.222-224.
- Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 755 с.
- Аникеев К.А., Введенская А.Я. Аномально-высокие пластовые давления - проявления глубинной жизни Земли // Проблемы геологии и геохимии эндогенной нефти. Киев: Наукова Думка, 1975.
- Антонов Ю.В., Слюсарев С.В., Чирков В.Н. Возможные причины временных изменений вертикального градиента силы тяжести // Геофизика. 2000. №4. С.45-51.
- Антонюк П.Н., Бронников К.А., Мельников В.Н. Определение гравитационной постоянной на спутнике Земли при движении частицы в окрестности точки либрации // Письма в Астрономический журнал. 1994. Т.20. №1. С.72-75.
- Аплонов С. В. Геодинамика раннемезозойского Обского палеоокеана. М.: ИО АН СССР, 1987. 97 с.
- Артюшков Е.В. Геодинамика. М.: Наука, 1979. 327 с.
- Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Циклическая динамика в природе и обществе. М.: Научный мир, 1998. Т.2. 429 с.
- Афанасьев А.Н. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. М.: Наука, 1967. 231 с.
- Афанасьев С.Л. Классификация циклов геологических процессов // Математические методы в геологии и горном деле. Тр. ВЗПИ, №112. М., 1978. С.133-171.
- Афанасьев С.Л. Флишевая формация: закономерности строения и условия образования. М.: Росвузнаука, 1993. 360 с.
- Афанасьев С.Л. Взрывы Галактики // Создание и физическая реальность. 1997. Т.2. №1. С.41-52.
- Афанасьев С.Л. Природные циклы // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. М.: Научный Мир, 1998. Т.2. С.88-94.
- Афанасьева В.И., Калинин Ю.Д., Могилевский Э.И. Изменения от дня ко дню скорости суточного вращения Земли и возможные причины этих изменений // Геомагнетизм и аэронавигация. 1965. Т.5. С.1098-1099.
- Байдал М.Х. Предстоящие вековые и внутривековые условия солнечной активности. Труды КазНИГМИ, вып.44, 1972.

- Балакина П.М., Введенская А.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Напряженное состояние в очагах землетрясений в поле упругих напряжений Земли // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1967. №6. С.3-15.
- Баландин Р. Пульс земных стихий. М.: Мысль, 1975.
- Балашов Ю.А., Виноградов А.Н., Митрофанов Ф.П. Изотопно-геохимические и петрологические данные о формировании и преобразовании протокры // Ранняя кора: ее состав и возраст. М.: Наука, 1991. С. 102-112.
- Баранов Г.И., Греков И.И. Геодинамическая модель Большого Кавказа // Проблемы геодинамики Кавказа. М.: Наука, 1982.
- Баркин Ю.В. Объяснение эндогенной активности планет и спутников и их цикличность // Известия РАН. Секц. Наук о Земле. 2002. №5. С.45-97.
- Барсуков В.Л., Урусов В.С. Фазовые превращения в переходной зоне и нижней мантии и возможные изменения радиуса Земли // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С.34-36.
- Барсуков О.М., Шаманин С.В. Сезонные изменения сейсмичности и скорости вращения Земли // Докл. Академии наук. 2001. Т.379. №1. С.99-100.
- Баширов А.Г., Витязев А.В. Крупномасштабная периодичность структуры Вселенной // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. М.: Научный Мир, 1998. Т.2. С.55-56.
- Белов А.А. Тектоническое развитие Альпийской складчатой области в палеозое. Тр. ГИН АН СССР. 1981. Вып.347.
- Белявский Н.А. Строение земной коры континентов по геолого-географическим данным. М.: Недра, 1981. 431 с.
- Бенькова Н.П., Могилевский Э.И. Эволюционные и импульсные изменения главного геомагнитного поля, вращения Земли и солнечная активность // Phys. Solariterr., Potsdam. 1976. №36. P.3-12.
- Беньоф Г. Сейсмические данные о строении коры и тектонической деятельности // Земная кора. М.: ИЛ., 1957.
- Берестецкий В.Б. Проблемы физики элементарных частиц. М.: Наука, 1979.
- Берке У. Пространство-время, геометрия, космология. Под. ред. Д.В. Гальцова. М.: Мир, 1985. 416 с.
- Берри Б.Л., Кузнецов О.Л., Баренбаум А.А. Циклы: состояние и проблемы исследований // Вестник МГУ. Сер.5. География. 1992. №1. С.17-25.
- Бильде Ю.А. Оценка неравномерности вращения Земли, вызванной магнитными возмущениями Солнца // Астрономия и астрофизика. Вып.28. Киев, 1976. С.14-21.
- Биргер Б.И., Ковтуненко С.М. Напряжения и деформации в литосфере, вызванные термоконвективными колебаниями Земли // Физика Земли. 1984. №3. С.3-20.
- Божко Н.А., Баркин Ю.В. Суперконтинентальная цикличность и ее возможные механизмы // Ломоносовские чтения 2002 года. М.: МГУ, 2002. С.4-6.

- Богати́ков О.А., Гонъшакова В.И., Симон А.К., Фрих-Хар Д.И. Ранние этапы эволюции магматизма планет земной группы // Геология и геофизика. 1989. №7. С.28-35.
- Богати́ков О.А., Симон А.К., Пухтель И.С. Ранняя кора Земли: Геология, петрология, геохимия // Ранняя кора: ее состав и возраст. М.: Наука, 1991. С. 15-26.
- Богданов Н.А., Добрецов Н.Л. Офиолиты Калифорнии и Орегона // Геотектоника. 1987. №5. С.97-105.
- Борукаев Ч.Б. Структуры докембрия и тектоника плит. Новосибирск: Наука, 1990. 190 с.
- Брагинский С.И. Возникновение 65-летнего колебания в Земном ядре // Физика Земли. 1987. №9. С.64-67.
- Брагинский В.Б., Гинзбург В.Л. О возможности измерения зависимости гравитационной постоянной от времени // ДАН СССР. 1974. Т.216. №2. С.300-302.
- Брагинский В.Б., Полнарев А.Г. Удивительная гравитация. М.: Наука, 1985. 159 с.
- Бронштэн В.А. Как движется луна? М.: Наука, 1990. 205 с.
- Буланже Ю.Д. Неприливные изменения силы тяжести // Повторные гравиметрические измерения. Вопросы теории, результаты. М.: ВНИИ Геофизика, 1980. С.4-21.
- Буланже Ю.Д. Некоторые результаты изучения неприливных изменений силы тяжести // ДАН СССР. 1981. Т.256. №6. С.1330-1331.
- Буланже Ю.Д. По поводу неприливных изменений силы тяжести // Известия АН СССР. 1983. №3.
- Буланже Ю.Д. Некоторые результаты изучения неприливных изменений силы тяжести // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С.73-84.
- Булатова Н.Н. Широтное распределение сейсмичности Земли в зависимости от положения Солнца и Луны // Вулканология и сейсмология. 2005. №2. С.57-78.
- Бураков КС., Начасова И.Е. Вариации геомагнитного поля в последние тысячелетия // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Янус-К, 2002. Т.3. С.181-184.
- Быков В.Г. Волны активизации разломов земной коры // Тихоокеан. геология. 2000. Т.19, №1. С.104-108.
- Быков В.Г. Модель инициирования сейсмической подвижки в неоднородном разломе земной коры // Тихоокеан. геология. 2000. Т.19, № 5. С. 105-110.
- Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т.46. №11. С.1176-1190.
- Быковский О.А. Проблемы современной физики. Алма-Ата: Гылым, 1995. 128 с.
- Валяев Б.И., Телепин М.А., Бережная Е.А., Вахтангаишвили Е.Хи др. Корреляция грязевулканической деятельности с солнечной активностью (на примере вулкана Ахтала) // ДАН СССР. 1980. Т.255. №5. С.1204-1207.

- Варшалович Д.А., Левшаков С.А., Потехин А.Ю. Проверка неизменности фундаментальных констант за космологическое время. УФН, 1993. Т. 163. №7. С.111-113.
- Веселов К.Е. Гравитационное поле и геологическое развитие Земли // Сов. Геология. 1976. №5. С.70-81.
- Веселов К.Е. Изменение силы тяжести во времени и корпускулярная теория тяготения // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1977.
- Веселов К.Е. Случайные совпадения или явления природы? // Геофиз. журнал. 1981. №3. С.50-61.
- Веселов К.Е., Долицкая Т.В. Формирование земной коры континентов и океанов с позиций гипотезы расширяющейся Земли // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С.159-165.
- Викулин А.В. Волновая (квантовая) тектоника // Материалы семинара «Вихри в геологических процессах». Петропавловск-Камчатский, 25 марта 2003 г.
- Висенс А., Висенс М. В поисках гравитационных волн. <http://zhurnal.relarn.ru/articles/2001/081.pdf>
- Витинский Ю.И. Циклы солнечной активности. М.: Знание, 1972. 40 с.
- Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука, 1973. 458 с.
- Витинский Ю.И. Солнечная активность. М.: Наука, 1983.
- Витязев А.В., Печерникова Т.В. Ранняя дифференциация Земли и проблема Лунного состава // Физика Земли. 1996. №6. С.3-16.
- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 294 с.
- Влодавец В.И. Вулканы Земли. М.: Наука, 1973. 169 с.
- Влодавец В.И. Вулканическая деятельность в цифрах и некоторые выводы // Геодинамика, магмообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский: Наука, 1974. С.134-145.
- Военные обнаружили новый магнитный полюс Земли. <http://www.gazeta.ru/2002/02/12/last43349.shtml>
- Володичев Н.Н., Подорольский А.Н., Левин Б.В., Подорольский Вл.А. Корреляция появления крупных серий землетрясений со временем фаз новолуния и полнолуния // Вулканология и сейсмология. 2001. №1. С.60-67.
- Гаврилов В.А. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // Докл. Академии наук. Т.414. №3. С.389-392.
- Гаджиев Я.А., Дадашев Р. М.: Сапунов А.Г. Периодичность извержений грязевых вулканов и солнечная активность // ДАН Азерб. ССР. 1985. Т.12. №11. С.38-42.
- Галушкин Ю.И., Дубинин Е.Н., Шеменда А.И. Термическая структура осевой зоны срединно-океанических хребтов // Известия РАН. Сер. Физика Земли. 1994. №5. С. 11-26.

- Гамбурцев А.Г., Гамбурцева Н.Г. Извержения вулканов // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. М.: Научный Мир, 1998. Т.2. С. 140-142.
- Гамбурцев А.Г., Кондорская Н.В., Олейник О.В. и др. Ритмы в сейсмичности Земли // Физика Земли. 2004. №5. С.95-107.
- Гарагаи И.А. Фазовые переходы как возможный источник колебательных движений литосферы // ДАН СССР. 1984. Т.279. №5. С. 1069-1073.
- Гармаш С.С., Линьков Е. М.: Петрова Л.Н., Швед Г.М. Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т.25. №12. С.1290-1299.
- Гейзенберг В. Введение в единую полевую теорию элементарных частиц. М.: Мир, 1968.
- Герасимов М.В., Мухин Л. М.: Диков Ю.П., Рехарский В.И. Механизмы ранней дифференциации Земли // Вестник АН СССР. 1986. №9. С. 10-23.
- Геологический словарь. В 2-х томах. М.: Недра, 1973.
- Геология на пороге новой научной революции // Природа. 1995. №1. С.33-51.
- Геофизика океана. Геодинамика. М.: Наука, 1979. Т.2. 416 с.
- Герцеништейн М.Е., Пустовойт В.И. Гравитационные волны // ЖЭТФ. 1962. №16. С.433.
- Гвишивиш Г.В., Лещенко Л.Н. Ритмы в ионосфере и верхней мантии Земли // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. М.: Научный мир, 1998. Т.2. С.292-296.
- Гинзбург В.Л. Как устроена Вселенная и как она развивается во времени. М.: Знание, 1968. 62 с.
- Гинзбург В.Л. О теории относительности. М.: Наука, 1979. 38 с.
- Гинтов О.Б. Планетарные деформации земной коры, ротация Земли и движение литосферных плит // Геофизический журнал. 2001. Т.23. №4. С.69-82.
- Глуховский М.З. Геологическая эволюция фундамента древних платформ (Нуклеарная концепция). М.: Наука, 1990. 212 с.
- Гневашев М.Н. Введение. В сб.: «Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли». М., 1971.
- Гончаров М.А. От тектоники литосферных плит к геодинамике иерархически подчиненных геосфер // Отечественная геология. 1999. №3. С. 10-14.
- Гончаров М.А. Западная и северная компоненты дрейфа континентов как результат вынужденной конвекции в мантии по правилу «буравчика» // Материалы совещания «Тектоника и геофизика литосферы». М.: ГЕОС, 2002. Т.1. С.128-131.
- Горбачев В. Ф. Новые данные изучения дна Мирового океана и их значение для проблемы газонефтености недр // Газовая промышленность. Серия: геология и развитие газоконденсаторных месторождений. Обзорная информация. М., 1979. Вып. 1.

- Горелик Г.Е. Космология Дирака в историко-методологическом контексте (к статье Х.Крага) // Польш Дирак и физика XX века. М.: Наука, 1990. С.92-94.
- Горелик Г.Е. Гравитационная постоянная. Массы Земли, Луны, Солнца. От 10 июля 1998 г. <http://webcenter.ru/~igorelic/gru.html>
- Горин В.А. Современное тектоническое движение в Каспийской впадине // Тр. конф. по вопросам регионов геологии Закавказья. Баку: АН Азерб ССР, 1952.
- Горшков Г.П. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1957. 288 с.
- Горшков Г.П. Региональная сейсмотектоника территории Юга СССР. Альпийский пояс. М.: Наука, 1984. 272 с.
- Горькавый Н.Н., Дмитроца А.И., Левицкий Л.С. и др. Годовой период в сейсмичности Земли. Зависимость от магнитуды и глубины // Физика Земли. 2000. №5. С.28-36.
- Горячев А.В. Основные закономерности развития Курило-Камчатской зоны. М.: Наука, 1966. 235 с.
- Гоцадзе О.Д. Об условиях возникновения Джавахетских землетрясений // Тр. 3-го всес. симпоз. по сейсм. реж. (3-7.06. 1968). Новосибирск: Наука, 1969. 4.2. С.38-50.
- Гравиразведка. Справочник геофизика. Под. ред. Е.А. Мудрецовой. М.: Недра 1981.
- Гравитация и топология. Актуальные проблемы. М.: Мир, 1966.
- Грачев А. Ф. Мантийные плюмы и проблемы геодинамики // Физика Земли. 2000. №4. С.3-37.
- Губкин И.М., Федоров С.Ф. Грязевые вулканы Советского Союза и их связь с генезисом нефтяных месторождений Крымско-Кавказской геологической провинции. М.П.: АН СССР, 1938.
- Гуфель И.Л. Дегазация Земли и сейсмичность // Земля и Вселенная. 2007. №2. С.25-32.
- Гущенко Н.И. Извержения вулканов мира. Каталог. М.: Наука, 1979. С.475.
- Гущенко Н.И. Закономерности размещения центров вулканической активности по земному шару // Вулканология и сейсмология. 1983. №6. С. 10-29.
- Гущенко Н.И. Цикличность извержений // Вулканология и сейсмология. 1985. №2. С.27-48.
- «Дальнобойность» сильных землетрясений // Природа. 1999. №4.
- Дараган С.К. Лунные и сезонные вариации параметров сейсмических волн от подземных ядерных взрывов. Геофизика // Докл. Академии наук. 1997. Т.352. №3. С.396-399.
- Деч В.Н., Кноринг Л.Д. Методы изучения периодических явлений в геологии. Л.: Недра, 1985.
- Джалилов Н.С., Ораевский В.Н. К теории 11-летнего цикла солнечной активности // Известия Академии Наук. Серия физическая. 2000. Т.64. №9. С. 1793-1798.
- Дибай Э.А., Каплан С.А. Размерности и подобие астрофизических величин. М.: Наука, 1977.

- Дикке Р. Влияние переменного во времени гравитационного взаимодействия на Солнечную систему // Гравитация и относительность. М.: Мир, 1965. С.251-294.
- Дирак П. А. М. Космологические постоянные // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979.
- Добрецов Н.Л. Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек // Докл. Академии наук. 1997. Т.357. №6. С.777-780.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г. Глубинная геодинамика. Новосибирск, 1994.
- Добровольский И.П. Распределение деформаций и напряжений при подготовке тектонического землетрясения // Физика Земли. 2003. №10. С.33-40.
- Добровольский И.П. Гравитационные предвестники тектонического землетрясения // Физика Земли. 2005. №4. С.23-28.
- Долгих Г.И., Кунцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Швеи В.А., Шевцов Б. М.: Широков О.П., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений // Докл. Академии наук. 2007. Т.414. №1. С.96-100.
- Дубровский В.А. Тектонические волны // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1985. №1. С.29-34.
- Дэвис П. Случайная Вселенная. М.: Мир, 1985.
- Евсеева Л.С. Многолетние колебания атмосферной циркуляции // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Янус-К, 2002. Т.3. С.334-338.
- Егоркина Г.Е., Краснопевцева Г.В., Шукин Ю.К. Геодинамическая характеристика очаговых зон // Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980. С.206-224.
- Елькин А.И. Механизм влияния лунно-солнечных приливов и возникновения землетрясений и цунами. М.: Московский инж.-строит. инст. 13 с.
- Ермаков Б.Е., Семов В.Н., Шукин Ю.К. Современная тектоническая активность литосферы по геофизическим данным // Современная тектоническая активность территории СССР. М.: Наука, 1984. С.8-23.
- Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. Влияние лунно-солнечных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры // Докл. Академии наук. 2000. Т.371. №2. С.235-239.
- Жаринов В.А. Проблема гранитообразования // Вестник МГУ. Сер.4, геология, 1987. №6. С.3-14.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1973.
- Жаров В.Е., Пасынок С.Л. Вращение Земли // Земля и Вселенная. 2004. №4. С.28-38.
- Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. JL: Наука, 1968. 96 с.
- Зайцев Н.А., Колесников С.М. Самосогласованное взаимодействие скалярного и тензорного гравитационных полей // Проблемы теории гравитации и эле-

- ментарных частиц. Вып.4. Под. ред. К.П. Станюковича. М.: Атомиздат, 1970. С.24.
- Зарайский М.П., Зубков С.И.* О суточном ходе сейсмичности очаговой области Сочинского землетрясения 1970 г. // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1975. №4. С.70-74.
- Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Перов С.П.* Пространственно-временная изменчивость озонового слоя Земли и «ультрафиолетовая опасность» / Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. М.: Научный Мир, 1998. Т.2. С.282-291.
- Зельдович Я.Б. и др.* Крупномасштабная структура Вселенной. М.: Мир, 1981. 515 с.
- Зельдович Я.Б.* Современная космология // Природа, 1983.
- Зельдович Я.Б.* Вселенная. М.: Квант, 1984. №3. с.2.
- Зельдович Я.Б.* Почему расширяется Вселенная // Природа. 1985. №2.
- Зельдович Я.Б., Новиков И.Д.* Релятивистская астрофизика. М.: Наука. 1967. 654 с.
- Зельдович Я.Б., Новиков И.Д.* Теория тяготения и эволюция звезд. М.: Наука, 1971.
- Зельдович Я.Б., Новиков И.Д.* Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
- Зельников М.И., Муханов В.Ф.* Спектр гравитационных волн в сценарии двойной инфляции // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т.54. Вып.4. С.201-204.
- Земцов А.Н., Тронь А.А.* Статистический анализ каталогов извержений вулканов мира // ДАН СССР. 1985. Т.285. №3. С.582-585.
- Зисман Г.А., Тодес О.М.* Курс общей физики. М.: Наука, 1972. Т.III.
- Зобин В.М.* Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979. 92 с.
- Зоненшайн Л.П., Городницкий А.М.* Палеозойские и мезозойские реконструкции континентов и океанов // Геотектоника. 1978. №2. С.3-2.
- Зубков С.И.* Предвестники землетрясений. М.: ОИФЗ РАН, 202. 140 с.
- Иваненко Д.Д.* Актуальные проблемы гравитации // Гравитация и топология. М.: Мир, 1966. С.5-33.
- Иваненко Д.Д., Сагитов М. У.* О гипотезе расширения Земли // Вестник МГУ. Сер.3. Физика, астрономия. 1961. №6. С.83-87.
- Иваненко Д.Д., Фролов Б.Н.* Деформация Земли и современная теория гравитации // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С.93-91.
- Иванов-Холодный Г.С.* Солнечная активность и геофизические процессы // Земля и Вселенная. 2000. №1. С.30-36.
- Изох Э.П.* Импактитный кратер Жаманшин и проблема текгитов // Геология и геофизика. 1991. №4. С.3-14.
- Измайлов В.П., Карагиоз О.В., Кузнецов В.А., Мельников В.Н., Росляков А.Е.* Временные и пространственные вариации измеряемых значений гравитационной постоянной // Измерительная техника. 1993. №10. С.3-5.
- Измайлов В.П., Карагиоз О.В., Пархомов А.Г.* Исследования вариаций результатов

- измерений гравитационной постоянной // Физическая мысль России. 1999. №12. С.20-26.
- Исследования акустико-гравитационных волн. Восточно-Сибирский центр исследования ионосферы Земли (ЦКП ВСЦИИЗ). Институт Солнечно-Земной физики СО РАН. <http://rp.iszf.irk.ru/esceir/nr/agv.htm> (АГВ).
- Ишков В.Н., Шибаев ИГ. Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Известия РАН. Сер. Физическая. 2000. Т.70. №10. С.1439-1442.
- Иордан П. Геофизические следствия гипотезы Дирака // Гравитация и топология. М.: Мир, 1966. С.292-301.
- Калинин М.И., Мельников В.Н. Возможные временные изменения фундаментальных «констант» // Проблемы теории гравитации и элементарных частиц. Вып.6. М.: Атомиздат, 1975. С.70-82.
- Калинин Ю.Д. Сейсмическая активность межпланетное магнитное поле. Красноярск: Инст. Физ. СО АН СССР, 1973. 16 с.
- Калинин Ю.Д. Солнечная обусловленность изменения длины суток и сейсмической активности. Красноярск: Инст. Физ. СО АН СССР, 1974. 23 с.
- Карагиоз О.В., Измайлов В.П. Гравитационная постоянная G. Мировой Центр Данных по физике твердой Земли. М.: Россия, <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/GravConst/welcome.html>
- Карагиоз О.В., Измайлов В.П. Измерение гравитационной постоянной крутильными весами. Измерительная техника // Исследование вариаций результатов измерений гравитационной постоянной. 1996 №10. С.3-9.
- Карагиоз О.В., Измайлов В.П., Кузнецов А.И. Методика и результаты исследований путей повышения точности гравитационной постоянной Кавендиша // Известия ВУЗ-ов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1992. №2. С.91-101.
- Карагиоз О.В., Измайлов В.П., Силин А.А., Духовской Е.А. Всемирное тяготение и теории пространства и времени. М.: УДН, 1987. С.102-126.
- Каракин А.В., Лобковский Л.И. Механика раздвижения океанской литосферы // Итоги науки и техники. Сер. мех. деф. тв. Тела. Т. 17. М.: ВИНТИ, 1984. С.63-151.
- Карпенко И.В. Физическая природа циклов Вильсона, Бертрона, Штиле // Материалы совещ. «Эволюция тектонических процессов в истории Земли». Новосибирск, 2004. Т. 1. С.217-220.
- Каррыев Б.С., Курбанов М.К., Николаев А.В. и др. Динамический режим сейсмической эмиссии: хаос и самоорганизация // ДАН СССР. 1986. Т.290. №1. С.67-71.
- Карташев И. Ученые не согласны с результатами измерения скорости гравитации. <http://www.compulenta.ru/2003/1/20/36895/>
- Карус Е.В., Кузнецов О.Л. Прогноз землетрясений // Итоги науки и техники. Сер. Физика Земли. М., ВИНТИ, 1980. Т.6. 182 с.

- Касьянова Н.А. Экологические риски и геодинамика. М.: Научный мир, 2003. 332 с.
- Кедров О.К. Очаг тектонического землетрясения - блочно-иерархическая структура // Докл. Академии наук. 2001. Т.380. №2. С.249-250.
- Кендал М.Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
- Кирилова И.В. О периодичности разрушительных землетрясений Кавказа и Турции // ДАН СССР. 1957. Т. 115. №4.
- Киселев В.М. Неравномерность суточного вращения Земли. Новосибирск: Наука. 1980. 160 с.
- Киссин И.Г. «Чувствительные зоны» земной коры как проявление динамики меж-блоковых взаимодействий // Докл. Академии наук. 2000, т.407, №3, с. 394-399
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Геомагнитные пульсации // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Янус-К, 2002. Т.3. С.449-453.
- Климичик И.А. Релятивистская астрономия. М.: Наука, 1983.
- Клуши Н.Г. Абрамович Н.Н. Интенсивность и экстенсивность вулканизма островных дуг как функция динамического режима субдукции и реологических свойств мантии // Геофизика. Геология и катастрофические природные явления. Геология континентальных окраин. М.: Наука, 1980. С. 141-147.
- Ковалевский Н.В. Энергетические аспекты солнечно-земных связей // Результаты исследований по международным геофизическим проектам. М.: Наука, 1976. 52 с.
- Кови К. Орбита Земли и ледниковые эпохи // В мире науки. 1984. №4. С.26-35.
- Колебания уровня морей и океанов за 15 000 лет. М.: Наука, 1982, 230с.
- Кондорская Н.В., Олейник О.В., Гамбурцев А.Г., Хромецкая Е.А. Ритмы по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2005. №6. С.68-80.
- Кондорская Н.В., Олейник О.В., Гамбург А.Г., Хромецкая Е.А. Ритмы по сейсмологическим данным // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Янус-К, 2002. Т.3. С. 198-207.
- Копеев А.В. Аномалии гравиметрических приливов // Докл. Академии наук. 2000. Т.372.№1. С. 104-107.
- Короновский Н.В., Копеев А.В., Герасимов И.А., Киквадзе Г.М. О возможных пределах изменения среднего радиуса Земли в геологическом прошлом // Геотектоника. 2003. №5. С.89-94.
- Короновский Н.В., Хаин В.Е., Ясаманов Н.А. Историческая геология. М.: Академия, 2006. 464 с.
- Кортаев М.Ю., Никишин А.М. Эволюция флюидного режима астеносферного выступления и стадийность магматизма, метаморфизма и металлогении внутри-континентальных линейных поясов // ДАН СССР. 1983. Т.237. №2. С.415-418.

- Круг Х. Поль Дирак и космологическая теория // Поль Дирак и физика XX века. М.: Наука, 1990. С.78-91.
- Крамаровский Я.М., Чечев В.П. Постоянны ли физические константы. М.: Природа, 1972. №5. С.46-51.
- Кролевец А.Н. Иерархическая модель активной геофизической среды // Вулканология и сейсмология. 2003. №6. С.71-80.
- Кропоткин П.Н. Возможная роль космических факторов в геотектонике // Геотектоника. 1970. №1. С.30-46.
- Кропоткин П.Н. Возможная роль космических факторов в геотектонике // Геотектоника. 1978. №6.
- Кропоткин П.Н. Проблемы геодинамики // Тектоника в исследованиях Геологического института АН СССР. М.: Наука, 1980. С. 176-247.
- Кропоткин П.Н. Пульсационная геотектоническая гипотеза В.А. Обручева и мобилизм // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С.24-33.
- Кропоткин П.Н., Валяев Б.М. Дегазация Земли и геотектоника // Дегазация Земли и геотектоника. М.: Наука, 1976. С.3-11.
- Кропоткин П.Н., Валяев Б.М. Геодинамика грязевулканической деятельности. Киев: Наукова Думка, 1981. С.148-178.
- Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н. Изменения радиуса Земли в геологическом прошлом // Геотектоника. 1992. №4. С.3-14.
- Кропоткин П.Н., Трапезников Ю.А. Вариации угловой скорости вращения Земли, колебаний полюса и скорости дрейфа геомагнитного поля и их возможная связь с геотектоническими процессами // Известия АН СССР. Сер. геол. 1963. №14. С.32-50.
- Кулагин В.В., Пасынок С.Л., Руденко В.Н., Сердобольский А.В. Об использовании гравитационно-волновых детекторов для изучения геофизических процессов // Известия Академии наук. Сер. Физическая. 2001. Т.65. №6. С.897-902.
- Кусков О.Л., Хитаров Н.И. Термодинамика и геохимия ядра и мантии Земли. М.: Наука, 1982. 279 с.
- Ландау Л.Д. Квантовая теория поля // Нильс Бор и развитие физики. М.: ИЛ., 1958. С.75.
- Латынина Л.А., Ризаева С.Д. Об изменениях приливных деформаций перед землетрясениями // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1985. №9. С.84-87.
- Левин Б.В. Ядро Земли - дирижер сейсмической активности? // Земля и Вселенная. 2001. №3. С.12-19.
- Левин Б.В. Роль движений внутреннего ядра Земли в тектонических процессах // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. С.444-460.
- Левин Б.В. О возможной природе сейсмической границы на глубине 70 км // Докл. Академии наук. 2007. Т.414. №1. С.101-104.
- Левин Б.В., Сасорова Е.В. Сейсмоволновой низкочастотный предвестник подготовки землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1994. №4-5. С.128-133.

- Левин Б. В., Сасорова Е. В. Низкочастотные сейсмические сигналы как региональные признаки подготовки землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. №4-5. С.108-115.
- Леонов Ю.Г. Тектоническая природа девонского орогенеза. М.: Недра, 1976. 192 с.
- Ле Пишон К, Францито Ж., Бонин Ж. Тектоника плит. М.: Мир, 1977.
- Летников Ф.А. К проблеме источников внутреннего тепла Земли // Докл. Академии наук. 2001. Т.378. №3. С.387-389.
- Линде А.Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология. М.: Наука, 1990.
- Линде А.Д., Фаломкин КВ., Хлопов М.Ю. Аннигиляция антипротонов в гелии как тест моделей, основанных на $n=1$ супергравитации // Сообщения объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1984.
- Линьков Е.М., Петрова Л.Н. Опыт регистрации длиннопериодных колебаний с помощью магнетронного сейсмографа // Исследование длиннопериодных сейсмических волн. Под ред. Е.Ф. Саваренского. Минск, 1976. С.51-57.
- Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Дунаев А.В. Наблюдения длиннопериодных колебаний Земли горизонтальным сейсмографом на антинаклонной платформе // Сейсмические приборы. 1988. Вып.20. С.90-96.
- Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Зурошвили Д.Д. Сейсмогравитационные колебания Земли и связанные с ними возмущения атмосферы // ДАН СССР. 1989. Т.306. №2. С.314-31.
- Линьков Е. М, Петрова Л.Н., Осипов КС. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // ДАН СССР. 1990. Т.313. №5. С.7.
- Линьков Е. М, Петрова Л.Н., Савина Н.Г. Яновская Т.Б. Сверхдлиннопериодные колебания Земли // ДАН СССР. 1982. Т.262. №2. С.321-324.
- Линде А.Д. Калибровочные теории и переменность гравитационной постоянной в ранней Вселенной // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т.30. Вып.7. С.479-482.
- Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Двухъярусная термохимическая модель конвекции и ее геодинамические следствия // Проблемы глобальной геодинамики. М., 2000. С.29-53.
- Лобковский Л.К, Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 610 с.
- Ломизе М.Г. О корреляции главных проявлений тектогенеза в мезозое и кайнозое // ДАН СССР. 1986. Т.290. №4. С.929-932.
- Ломnitz Ц., Розенблюд Э. Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. 376 с.
- Лурсманашвили О.В. О возможности влияния активности Солнца на распределение землетрясений Кавказа // Сообщ. АН Груз.ССР. 1972. Т.65. №2. С.309-312.
- Лурсманашвили О.В. О периодичности сильных землетрясений Кавказа // Известия АН Груз.ССР. Сер. Физика Земли. 1973. №2. С.80-86.

- Лурсманашвили О.В.* Временно-пространственное распределение сильных землетрясений Кавказа и возможность взаимосвязи землетрясений через пластические волны // Сообщ. АН Груз.ССР. 1977. №3. С.601-604.
- Любушин А.А. (мл.)* Периодичности и катастрофы во взаимодействии геофизических процессов // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный мир, 1998. С.380-385.
- Люкэ Е.И., Ан В.А., Пасечник И.П.* Обнаружение фронта тектонической глобальной волны при сейсмическом просвечивании Земли // ДАН СССР. 1988. Т.301. №3. С.569-573.
- Ляпхер В.М.* Вариация сейсмического режима Земли под влиянием изменений длины солнечного цикла // Физика Земли. 2000. №10. С.93-96.
- Ляховец В.Д.* Проблемы метрологического обеспечения измерений гравитационной постоянной // Проблемы современной физики. Алма-Ата: Гылым, 1995. 113 с.
- Маженов Н.* Уточненный закон всемирного тяготения Ньютона. Депонир. Ст. КазГосИНТИ 02.03.2000, Регистр. №8755-Ка 00.
- Макарова Е.А., Харитонов А.В.* Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная. М.: Наука, 1972. 288 с.
- Максимов Е.В.* Космические факторы оледенения // Известия Всес. Геогр. о-ва. 1970. Вып.4. С.339-346.
- Малиновский Н.В.* Подводные извержения на Каспийском море // Закавказский краеведческий сборник. 1, серия А. 1943.
- Манк У., Макдональд Д.* Вращение Земли. М.: Мир, 1964. 384 с.
- Маракушев А.А.* Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. М.: Наука, 1992.
- Маракушев А.А.* Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М.: Наука, 1999. 252 с.
- Маракушев А.А.* Происхождение Земли и Луны в свете новейших достижений астрономии // Известия Секции наук о Земле РАЕН. 2000. Вып.5. С.53-62.
- Мархинин Е.К.* Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
- Матвеев П.С., Голубицкий В.Г.* Влияние приливообразующих сил Луны и Солнца на частоту землетрясений Закавказья // Тр. Полтавск. гравиметрии. Обсерваторит. 1961. Т. 10. С.67-74.
- Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1962. 284 с.
- Мельников В.Н.* Метрологические аспекты гипотез и теорий, связывающих фундаментальные физические величины // Проблемы гравитации и элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1976. Вып.7. С. 190-200.
- Мехтиева Ш.Ф., Халилов Э.Н.* Пространственно-временное распределение извержений вулканов как отражение пульсации Земли // Докл. АН Азерб.ССР. 1983. Т.39. №11. С.76-80.
- Мехтиева Ш.Ф., Халилов Э.Н.* Как развивается Земля. (Гипотезы и факты). Баку: Знание, 1984. 72 с.

- Мехтиев Ш.Ф., Халилов Э.Н. О возможности выявления связи извержений вулканов с активностью Солнца // Вулканология и сейсмология. 1985. №3. С.64-67.
- Мехтиев Ш.Ф., Халилов Э.Н. Вулканизм и геодинамика. М.: Природа, 1987. №3. С.46-49.
- Мехтиев Ш. Ф., Халилов Э.Н. О периодичности вулканической активности // ДАН Азерб.ССР. 1987. Т.XLIII. №11. С.35-39.
- Мехтиев Ш.Ф., Халилов Э.Н. Отражение геодинамических процессов в пространственно-временном распределении извержений вулканов мира // Известия АН Туркмен.ССР. Сер. геол. 1987. №2.
- Мехтиев Ш.Ф., Халилов Э.Н. Ритмы Земных катастроф. Баку: Элм, 1988. С.80-90.
- Мехтиев Ш.Ф., Хаин В.Е., Исмаил-Заде Т.А., Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности вулканических извержений // ДАН СССР. 1986. Т.289. №4. С. 1462-1464.
- Милановский Е.Е. Некоторые закономерности тектонического развития и вулканизма Земли в фанерозое (проблемы пульсации и расширения Земли), Геотектоника, 1978, №6, с.3216.
- Милановский Е.Е. Развитие и современное состояние проблем расширения и пульсаций Земли. В кн. Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984, с.8-24.
- Милановский Е.Е. О корреляции фаз учащения инверсий геомагнитного поля понижений уровня Мирового океана и фаз усиления деформаций сжатия земной коры в мезозое и кайнозое // Геотектоника. 1996. №1. С.3-11.
- Милановский Е.Е., Гамбурцев А.Г. Особенности колебаний уровня океана в фанерозое и сопоставление с частотой геомагнитных инверсий // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный Мир, 1998. С.80-83.
- Милановский Е.Е., Никишин А.М., Копаевич Л.Ф. и др. О коррекции фаз реорганизации кинематики литосферных плит и короткоприводных изменений уровня Мирового океана // Докл. РАН. 1992. Т.326. №2. С.3 13-317.
- Милуков В. К. Изменяется ли гравитационная постоянная? // Природа. 1986. №6. С.96-104.
- Минц М.В. Архейская тектоника миниплит // Геотектоника. 1998. №6. С.4-19.
- Михайлов А.А. Земля и ее вращение. М.: Наука, 1984. 78 с.
- Михайлов В. О., Тихоцкий С.А., Диаман М., Пане И. Исследование возможности обнаружения и изучения вариаций силы тяжести геодинамического происхождения по современным спутниковым гравиметрическим данным // Физика Земли. 2005. №3. С. 18-32.
- Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. М.: Недра, 1986. 180 с.
- Молоденский М.С., Молоденский С.М. О возможной связи изменений силы тяжести и скорости вращения Земли // Известия АН СССР. Физика Земли. 1975. №6. С.3-11.

- Муратов М.В. Происхождение материков и океанических впадин. М.: Наука, 1975. 176 с.
- МычкаА.Г., ТерemenкоА.Н., ЩенецН.С. Прогноз аварийных ситуаций на трубопроводах по материалам космических съемок // Матеріали Третьої Української наради користувачів аерокосмічною інформацією (20-24 листопада 2000 р., Київ). Кшв: Знання України, 2001. С. 128-131.
- Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. JL: Наука, 1969. 487 с.
- Нарликар Дж. Неистовая Вселенная. М.: Мир, 1985.
- Нейман В.Б. О причинах ритмичности в природе, геологические и физико-математические аспекты // Математические методы анализа цикличности в геологии. 1984. №7. С. 165-167.
- Ненахов В.М. Геодинамические особенности раннего архея // Геотектоника. 2001. №1. С.3-15.
- Никишин А.М. Характер и масштаб проявлений расширения и сжатия в эволюции планетных тел солнечной системы // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С.61-72.
- Никишин А. М., Хаин В.Е. О характере изменения суммарной длины срединно-океанских хребтов в ходе геологической истории Земли // ДАН СССР. 1991. Т.320. №1. С.157-161.
- Николаевский В.Н. Механика геоматериалов и землетрясений // Итоги науки и техники. Сер. мех. деф. тв. тела. Т.15. М., ВИНТИ. С.149-230.
- Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К. Теория быстрых тектонических волн // Прикладная математика и механика. 1985. Т.49. Вып.3. С.462-469.
- Николсон И. Тяготение, черные дыры и Вселенная. М.: Мир, 1983. 240 с.
- Новиков ИД. Эволюция Вселенной. 3-е, перераб. и доп. изд. М.: Наука, 1990. 189 с.
- Новикова А.С., Штрейс Н.А., Щипанский А.А. Гранит-зеленокаменные области и проблема архейской океанической коры // Геотектоника. 1991. №4. С. 3-9.
- Обручев В.А. Пульсационная гипотеза геотектоники // Известия АН СССР. Сер. геолог. 1940. №1. С.12-30.
- Овчинников В.М., Краснощекое Д. Н., Каазик П.Б. Новое представление о границе между внешним и внутренним ядром Земли // Докл. Академии наук. 2007. Т.417. №3. С.389-392.
- Огурцов М.Г. О возможном вкладе солнечно-космических факторов в глобальное потепление XX века // Известия РАН. Сер. Физическая. 2007. Т.71. №7. С.1047-1048.
- Одесский И.А. Ротационно-пульсационный режим Земли и его геологические следствия. СПб.: Пангея, 2004. 27 с.
- Одинцов С.Д., Иванов-Холодный Г.С., Георгиева К. Солнечная активность и глобальная сейсмичность Земли // Известия РАН. Сер. Физическая. 2007. Т.71. №4. С.608-610.
- Окунь Л.Б. Фундаментальные константы физики // УФН. 1971. Т. 161. №9. С.177-194.

- Оль А.И. Проявление 22-летнего цикла солнечной активности в климате Земли // Труды ДАНИИ. 1969. Вып.289.
- Осинов В.И. Природные катастрофы на рубеже XXI века // Вестник Российской Академии Наук. 2001. Т.71. №4. С.291-302.
- Осокин А.Р., Вальчук Т.Е. Фрактальный анализ временного ряда солнечной активности // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Том 3. М.: Янус-К, 2002. С.454-457.
- Отнес Р., Энноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
- Павлов Н.Н. Изменения скорости вращения Земли, деформация земной коры и солнечная активность // Известия Главн. астроном. обсерват. 1968. №183.
- Парийский Н.Н. Изменения длины суток и деформация Земли // Астр. журн. 1945. Т.22. Вып.2.
- Парийский Н.Н. Неравномерность вращения Земли. М.: АН СССР, 1954. 47 с.
- Парийский Н.Н. Неравномерность вращения Земли // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. Т.22, Вып.2. М.: АН СССР, 1955.
- Парийский Н.Н. Нерегулярные изменения силы тяжести и вращения Земли // Письма в Астроном. журн. 1982. Т.8. №6. С.378-380.
- Парийский Н.Н. О нерегулярных изменениях скорости вращения Земли и возможной связи их с деформациями Земли и изменениями силы тяжести // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С.84-93.
- Парийский Н.Н., Кузнецов М.В., Кузнецова Л.В. Влияние океанических приливов на вековое замедление вращения Земли // Известия АН СССР. Физика Земли. 1972. №2. С.3-12.
- Парийский Н.Н., Перцев Б.П., Крамер М.В. Влияние перераспределения атмосферных масс на значение силы тяжести. М.: Межвед. геофиз. ком. при Презид. АН СССР, 1983. 161 с.
- Париж: Гравитационную постоянную измеряет ртуть, <http://anomalina.narod.ru/news/540.htm>
- Перевоорот в теории гравитации. Новости РУФОС: 21.10.02 06:36:55. <http://rufon.r2.ru/newsprint.php?mode=printversion&file=021021063655>
- Перцев Б.П. Периодические смещения центра масс Земли под действием приливных колебаний уровня Мирового океана // Физика Земли. 1997. №9. с.55-56.
- Перцев Б.П. О вековом замедлении вращения Земли // Физика Земли. 2000. №3. С.35-39.
- Перцев Б.П. Приливные деформации поверхности геоида // Физика Земли. 2002. №8. С.3-5.
- Петров В.П. Древние мощные коры выветривания и их природа // Известия АН СССР. Сер. геол. 1991. №1. С.96-111.
- Петров О.В. Нелинейные явления термогравитационной неустойчивости и внутренние гравитационные волны Земли // Докл. Академии наук. 1992. Т.326. №3. С.506-509.

- Петрова Л.Н.* Взаимодействие разномасштабных волновых процессов в твердой Земле // Докл. Академии наук. 1993. Т.332. №2. С.237-239.
- Петрова Г.Н., Гамбурцев А.Г.* Ритмы палеонапряженности геомагнитного поля за последние 300 тысяч лет // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный Мир, 1998. С.84-87.
- Петрова Л.Н., Лепешкин Ф.Г.* О спектральном составе и уровне помех на записях длиннопериодного сейсмометра // Вопросы геофизики. 1980. Вып.28. С.199-203.
- Петрова Л.Н., Линьков Е.М.* Спектры длиннопериодных колебаний, предвещающих землетрясения // Вопросы геофизики. 1978. Вып.27. С.60-66.
- Петрова Л.Н., Линьков Е.М., Зурошвили Д.Д.* Планетарный характер сверхдлиннопериодных колебаний Земли // Вестник ЛГУ, 1988. Сер.4. Вып.4 (25). С.21-26.
- Петрова Л.Н., Любимцев Д.В.* Планетарный характер сейсмогравитационных колебаний Земли // Физика Земли. 2006. №2. С.26-36.
- Петрова Л.Н., Савина Н.Г.* Низкочастотный спектр Земли // Изучение строения Земли по сейсмологическим данным. Киев.: Наук, думка, 1986. С.67-73.
- Пиблс П.* Физическая космология. М.: Мир, 1975.
- Писаренко В. Ф.* Вычислительная сейсмология. Вып.10. М.: Наука, 1973. С.118-149.
- Покровская Т.В.* Солнечная активность и климат // Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. М., 1971.
- Полетаев А.И.* Современные дислокации зоны Главного Копетдагского разлома и некоторые вопросы корреляции сейсмических и геологических параметров // Геофизические условия в очаговых зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1983. С.88-97.
- Пронин А.А.* Каледонский цикл тектонической истории Земли. М.: Наука, 1969. 231 с.
- Пронин А.А.* Альпийский цикл тектонической истории Земли // Мезозой. Л.: Наука, 1973.
- Пушкарев Ю.Л.* Мегациклы в эволюции системы кора-мантия. Л.: Наука, 1989. 200 с.
- Пуцаровский Ю.М.* Линейность и нелинейность в геологии // Геотектоника. 1999. №3. С.42-49.
- Пуцаровский Ю.М.* Глубины Земли: строение и тектоника мантии // Природа. 2001. №3. С.13-15.
- Пуцаровский Ю.М.* Строение, энергетика и тектоника мантии Земли // Вестник РАН. 2005. Т.25. №12. С.1115-1122.
- Пуцаровский Ю.М.* Тектоника Земли. Избранные труды. Том.2. М.: Наука, 2005. 555 с.
- Пуцаровский Ю. М., Пуцаровский Д.Ю.* Геосферы мантии Земли // Геотектоника. 1999. №1. С.3-14.
- Ранняя история Земли. М.: Недра, 1980. 620 с.

- РастХ. Вулканы и вулканизм. М.: Мир, 1982. 344 с.
- Рахманов Р.Р. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании газонефтенных недр. М.: Недра, 1967. 174 с.
- Рахманов Р.Р. Грязевой вулканизм подвижных поясов и его геотектоническая позиция. Автореф. дис. Баку, 1982. 50 с.
- Ризниченко Ю.В., Куликов В.И. и др. Изучение сейсмичности территории Азербайджана и прилегающей акватории Каспия с глубинным строением с целью выделения сейсмоактивных зон. Отчет по теме 42-71. АЗВНИИГеофизика, Баку, 1973.
- Родионов Д.А. Статическое решение в геологии. М.: Недра, 1981. 231 с.
- Родкин М.В. Динамика земной тверди // Земля и Вселенная. 2007. №4. С.25-30.
- Розенталь И.Л. Физические закономерности и численные значения фундаментальных постоянных // УФН. 1980. Т. 131. Вып.2. С.238-256.
- Розенталь И.Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. Под ред. М.И. Подгорецкого. М.: Наука, 1984. 112 с.
- Розенталь И.Л. Геометрия, динамика, вселенная. Под ред. А.Д. Линде. М.: Наука, 1987. 144 с.
- Рокитянский И.И. Эксперименты с крутильными маятниками и определение гравитационной постоянной G // Геофизический журнал. 2001. Т.23. №2. С.19-29.
- Ротанова Н. М., Пушков А.Н. Глубинная электропроводность Земли. М.: Наука, 1982. 296 с.
- Рубашев Б.М. К вопросу о возможности существования солнечных циклов более высоких порядков // Бюллетень комиссии по исследованию Солнца. Л., 1949. №2(16).
- Рубашев Б.М. Проблемы солнечной активности. М.-Л., 1964.
- Рубинштейн М.М. Орогенические фазы и периоды складчатости в свете данных абсолютной геохронологии//Геотектоника. 1967. №2. С.35-49.
- Руденко В.Н., Гусев А.В., Кравчук В.К., Виноградов М.П. Поиск астро-гравитационных корреляций//Письма в ЖЭТФ. 2000. Т.118. Вып.5. С.1-17.
- Рудич Е.М. Движущиеся материи и эволюция океанического ложа. М.: Недра, 1983.268 с.
- Рудник В.А., Соботович Э.В. Моделирование состава древнейшей литосферы по космогеологическим данным // Ранняя кора: ее состав и возраст. М.: Наука, 1991. С.63-76.
- Руссо П. Землетрясения. М.: Прогресс, 1966.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Еще раз о модуляции региональных высокочастотных сейсмических шумов // Физика Земли. 1989. №12. С.94-99.
- Рябов Ю.А. Движение небесных тел. М.: Наука, 1988. 238 с.
- Савина Н.Г., Типисев С.Я., Линьков Е. М., Яновская Т.Б. Наблюдения длиннопериодных колебаний Земли // Известия АН СССР. Физика Земли. 1984. №8. С.3-12.

- Сажин М.В., Устюгов С.Д., Чечеткин В.М. Гравитационное излучение при взрывах сверхновых звезд // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т.64. Вып.12. С.817-822.
- Сазонов Б.И. Двойная природа ритмов в земных процессах // Дендроклиматология и радиоуглерод. Вильнюс, 1972.
- Сакс Р. Гравитационное излучение // Гравитация и топология. М.: Мир, 1966. С.84-151.
- Сафронов В.С. Современное состояние теории происхождения Земли // Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. №6. С.3-25.
- Святловский А.Е. Структурная вулканология. М.: Недра, 1971. 232 с.
- Серёбренников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.
- Сергин В.Я. Моделирование крупных колебаний климата и оледенения Земли в антропогене // Антарктика. Вып.11. М., 1972.
- Сергин С.Я. Динамические связи в системе «земная поверхность-атмосфера» как причина изменений климата. - Известия АН СССР, серия № 6, 1966
- Сидоренков Н.С. Неравномерность вращения Земли по данным астрономических наблюдений // Астроном, ж. 1975. Т.52. С.1108-1112.
- Сидоренков Н.С. Неравномерность вращения Земли и движение полюсов // Природа. 1982. №4. С.82-90.
- Сидоренков Н.С. Солнечная и геомагнитная активность // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный Мир, 1998. С.48-50.
- Сидоренков Н.С. Ритмы в атмосфере // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный Мир, 1998. С.278-281.
- Сидоренков Н.С. Нестабильность вращения Земли // Вестник РАН. 2004. Т.74. №8. С.701-715.
- Сидоренков Н.С., Гамбурцев А.Г. Солнечная и геомагнитная активность // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Том 3. М.: Янус-К, 2002. С.444-449.
- Сливинский А.П., Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Образцов Ю.М.: Шульга А.В. Геофизический журнал. 2006. Т.28. №2. С.109-117.
- Смирнов В.Б. Оценка длительности цикла разрушения литосферы Земли по данным каталогов землетрясений // Физика Земли. 200. №10. С.13-32.
- Смирнов Л.С., Любина Ю.Н. О возможности изучения изменения силы тяжести с геологическим временем // ДАН СССР. 1969. Т. 187. №4. С.874-877.
- Собакаръ Г.Т., Дайнеко В.И. Корреляционные пространственно-временные связи между квазипериодическими вариациями силы тяжести, солнечной активностью, энергией землетрясений и структурой земной коры // Геофиз. сборник АН УССР. 1978. С.3-8.
- Соботович Э.В. Космохимическая модель происхождения Земли // Наука и технология в России. 1993. №1. С.112-123.

- Соколов С.Д. Аккреционная тектоника Корякеко-Чукотского сегмента Тихоокеанского пояса. М.: Наука, 1992. 182 с.
- Соловьев С.Л. Некоторые статистические распределения землетрясений и тектоническое строение сейсмических зон // Известия АН СССР. Сер. Геофизика. 1961. №1. С.13-20.
- Сонечкин Д.М. О нелинейной природе Чандлеровского движения полюсов Земли // Докл. Академии наук. 2001. Т.381. №5. С.681-683
- Сорохтин О.Г. Глобальная эволюция Земли. М.: Наука, 1974.
- Сорохтин О.Г. Ранние стадии развития системы Земля-Луна // Известия Секции наук о Земле РАЕН. 1999. Вып.2. С. 141-153.
- Сорохтин О.Г. Эволюция климата Земли и происхождение ледниковых эпох, Вестник Российской Академии наук. 2006. Т.76. №8. С.699-706.
- Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Глобальная эволюция Земли. М.: МГУ, 1991. 446 с.
- Спорышев П.В., Катцов В.М. Пространственно-временные особенности глобального потепления // Докл. Академии наук. 2006. Т.410. №4. С.532-537.
- Станюкович К.П. К вопросу о возможном изменении гравитационной постоянной // ДАН СССР. 1962. Т. 147. №6. С. 1348-1351.
- Станюкович К.П. Гравитационное поле и элементарные частицы. М.: Наука, 1965.
- Станюкович К.П. К вопросу о теории связи космологических и квантовых «констант» // Теория относительности и гравитация. М.: МОИП, 1971. С.3-19.
- Станюкович К.П., Мельников В.Н. Гидродинамика, поля и константы в теории гравитации. М.: Энергоатомиздат, 1983. 254 с.
- Старостенко В.И., Гейко В.С., Кендзера А.В. и др. Катастрофическое землетрясение 26 декабря 2004 г. у берегов Суматры: причины, последствия и уроки // Геофизический журнал. 2005. Т.27. №6. С.940-961.
- Стаховский И.Р. Самоорганизация и самоподобие сейсмотектонических объектов // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный Мир, 1998. С.372-379.
- Стовас М.В., Нестеренко П.Г. Гравитация и сейсмичность // Природа. 1963. №7.
- Сува А. Землетрясения и активность вулканов в 1971 году. Кисе. 1971. №176. С.3164-3168.
- Сытинский А.Д. О связи геотектоники с солнечной активностью // Инф. Бюлл. №28. 1961.
- Сытинский А.Д. Современное тектоническое движение как одно из проявлений солнечной активности // Геомагнетизм и аэро. 1963. №1.
- Сытинский А.Д. О связи сейсмичности Земли с солнечной активностью // Успехи физ. Наук. 1973. Т.3. №2. С.367-369.
- Сытинский А.Д. О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли // ДАН СССР. 1973. Т.208. №5.
- Сытинский А.Д. Зависимость сейсмичности Земли от процессов на Солнце, в межпланетной среде и в атмосфере // Атлас временных вариаций природ-

- ных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный мир, 1998. С.10-12.
- Так ли постоянна гравитационная постоянная, http://www.rol.ru/news/misc/space-news/02/09/27_007.htm
- Тамразян Г.П. О сейсмической активности северно-западного обрамления Тихого океана // Известия АН СССР. Сер. Геофизика. 1958. №5. С.664-668.
- Тамразян Г.П. Промежуточные и глубоководные землетрясения в связи с космическими условиями Земли // Известия АН СССР. Сер. геофизика. 1959. №4.
- Тамразян Г.П. Некоторые особенности освобождения сейсмической энергии недр Земли в связи с изменениями приливообразующих и других сил // 5-ое совещание по проблемам планетологии. Л. 1965. С.78-83.
- Тейлор Э.Ф., Уилер Дж.А. Физика пространства-времени. М.: Мир, 1969.
- Тимашев С.Ф., Крученицкий Г.М., Будников Е.Ю. и др. Методология анализа временных рядов на основе теории детерминированного хаоса // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный мир, 1998. С.386-397.
- Тихонов И.Н. Закон повторяемости отрезков времени между последовательными землетрясениями // Докл. Академии наук. 2002. Т.387. №2. С.250-252
- Торн К. Черные дыры и гравитационные волны // Вестник Российской Академии наук. 2001. Т.71. №7. С.587-590.
- Троицкий В.С. Об эволюции фундаментальных констант // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. №9. С.1902-1903.
- Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физических наук. 1969. Т.97. Вып.3. С.453-494.
- Трубицын В.П. Глобальные тектонические процессы, формирующие лик Земли // Геофизика на рубеже веков. М., 1999. С.80-92.
- Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. 1993. №4. С.43-53.
- Успенский Г.Р. Космонавтика XXI - Гравитация-Гравитация вещества. 1997, 2000. <http://www.space21.boom.ru/PHTML/PI/pl.htm>
- Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Гладких И.П., Капочкин Б.Б. Основы неогеодинимики, газовые сети как элемент деформационного мониторинга. Одесса: Астропринт, 2000. 144 с.
- Федорин Я.В. Модель эволюции ранней земли. Киев: Наукова думка, 1991. 110 с.
- Федоров В.М. Сопоставление хронологии вулканической активности Земли с характеристиками ее орбитального движения // Вулканология и сейсмология. 2001. №5. С.65-67.
- Федоров В.М. Хронологическая структура и вероятность вулканической активности в связи с приливной деформацией литосферы // Вулканология и сейсмология. 2005. №1. С.44-50.
- Федоров В.М. Многомерный анализ и хронологическая структура геодинамической активности Земли // Вестник МГУ. Сер.4. Геология. 2007. №4.

- Федоров В.М. Особенности суточного распределения землетрясений в связи с ее вращением // Вулканология и сейсмология. 2005. №3. С.62-65.
- Федоров Ф.И. Астрофизика, кванты и теория относительности. М.: Мир, 1982. 550с.
- Федотов С.А. Глубинное строение, свойства верхней мантии и вулканическая деятельность Курило-Камчатской дуги по сейсмологическим данным на 1964 г. // Вулканизм и глубинное строение Земли. М.: Наука, 1966. Т.3. С.8-25.
- Фейнман Р. КЭД Странная теория света и вещества. М.: Наука, 1988. 144 с.
- Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.
- Филонович С.Р. Самая большая скорость. М.: Наука, 1983. 175 с.
- Фокс С., Дозе К. Молекулярная эволюция и возникновение жизни. М.: Мир, 1975.
- Фридман А.М., Клименко А.В., Поляченко Е.В., Фридман М.В. О связи глобальной сейсмической активности Земли с особенностями ее вращения // Вулканология и сейсмология. 2005. №1. С.67-74.
- Хаин В.Е. О непрерывно-прерывистом течении тектонических процессов // Известия АН СССР. Сер. геол. 1950. №6. С.26-44.
- Хаин В.Е. Направленность, цикличность и неравномерность развития земной коры // Материалы II Всесоюз. совещ. по проблемам тектоники. М. 1964. С.13-28.
- Хаин В.Е. Об общих закономерностях развития тектонических процессов во времени - проблемы прерывистости-непрерывности, цикличности-направленности // Вестник МГУ. Сер.4. Геология. 1971. №4. С.3-22.
- Хаин В.Е. Цикличность и геотектоника // Основные теоретические вопросы цикличности седиментогенеза. М.: Наука, 1977. С.213-221.
- Хаин В.Е. Современные представления о механизме тектонических движений и деформаций // Известия ВУЗов. 1984. №2. С.8-12.
- Хаин В.Е. Циклы Бертрана и циклы Вилсона // Докл. Академии наук. 1992. Т.325. С.557-559.
- Хаин В.Е. Два главных направления о современных науках о Земле: ранняя история Земли и глубинная геодинамика// Вестник МГУ, 1993. №6. С.3-20.
- Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. М.: Наука, 1994.
- Хаин В.Е. Современная геология: Проблемы и перспективы // Соросовский образовательный журнал. Науки о Земле. 1996.
- Хаин В.Е. Крупномасштабная цикличность в тектонической истории Земли и ее возможные причины // Геотектоника. 2000. №6. С.13-14.
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (Год 2000). М.: Научный мир, 2001. 604 с.
- Хаин В.Е. Современная геодинамика: достижения и проблемы // Природа. 2002. №1. С.51-59.
- Хаин В.Е. Земля - уникальная планета Солнечной системы // Вестник РАН. 2003.

- Т.73. №9. С.822-829.
- Хаин В.Е. Взаимодействие атмосферы, биосферы и литосферы - важнейший процесс в развитии Земли // Вестник РАН. 2007.1.11. №9. С.784-810.
- Хаин В.Е., Гаджиев А.Н., Кенгерли Т.Н. О тектонической природе Апшеронского порога Каспийского моря // Докл. РАН. 2007. Т.414. №4. С.523-527.
- Хаин В.Е., Гончаров М.А. Геодинамические циклы и геодинамические системы разного ранга: их соотношение и эволюция в истории Земли // Геотектоника. 2006. №5. С.3-24.
- Хаин В.Е., Исмаил-заде Т.А., Халилов Э.Н. О закономерности пространственно-временного распределения извержений вулканов // Проблемы ритмов в естествознании. Материалы 2-го Международного симпозиума 1-3 марта 2004, Москва, Изд. Российского Универ. Дружбы Народов. С.11-13.
- Хаин В.Е., Леонов Ю.Г.-ред. Международная Тектоническая карта Мира, масштаб 1: 15 000 000. Л., 1984.
- Хаин В.Е., Леонов Ю.Г. Тектоника континентов и океанов. Объяснительная записка к Международной Тектонической карте Мира. Под ред. О. Доттен. М.: Наука, 1984.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: МГУ, 1995. 479 с.
- Хаин В.Е., Михайлов А.Е. Общая геотектоника. М.: Недра, 1985.
- Хаин В.Е., Сеславинский К.Б. Историческая геотектоника: Палеозой. М.: Недра, 1991.398 с.
- Хаин В.Е., Сеславинский К.Б. Глобальные ритмы в фанерозойской эндогенной активности Земли // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1994. №6. С.40-63.
- Хаин В.Е., Сеславинский К.Б., Кузнецов Н.Б. Геологическая цикличность Земли // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный мир, 1998. С.21-27.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Гравитационные эффекты перед сильными удаленными землетрясениями // Вестник Международной Академии Наук. №2. М., 2007. С.45-52.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. SWB, Burgas, 2008, 304 с.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н., Исмаил-Заде Т.А. Периодичность активности вулканов разных геодинамических обстановок и возможная пульсация радиуса Земли // Пятые геофизические Чтения им. В.В. Федынского. Тез. Докл. 27 февр. - 01 марта 2003 г. С.145-146.
- Хаин В.Е., Ясаманов Н.А. Парадокс позднепротерозойских оледенений и дрейф материков // Вестник МГУ. Сер.4. Геология. 1987. №1. С. 15-25.
- Халилов Э.Н. О происхождении нефти в акватории Каспия с позиций тектоники литосферных плит// Азербайджанское Нефтяное Хозяйство. 1983. №10.
- Халилов Э.Н. Опыт математической обработки данных стохастических систем в геологии (на примере сведений об извержениях грязевых вулканов) // ЭИ

- ВИЭМС. Отечество, производств, опыт. Общ. и регион, геол. геологич. картирование. Вып. 10. М.:, 1986, с. 1-6.
- Халилов Э.Н. Выявление некоторых особенностей вулканической активности по оценкам функций спектральных плотностей // Вулканология и сейсмология. 1987. №3. С.104-107.
- Халилов Э.Н. Цикличность природных катаклизмов и некоторые проблемы гравитации. Под ред. Ш.Ф. Мехтиева. Баку: Гянджлик, 1989. 42 с.
- Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности современных проявлений вулканизма и сейсмичности и их связь с глубинными процессами. Автореф. дисс. док. геол.-мин. наук, М.: МГУ, 1989. 33 с.
- Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности современных геодинамических процессов // Азерб. нефт. Хозяйство. 1998. №6. С. 1-7.
- Халилов Э.Н. К вопросу о возможности взаимосвязи вариаций гравитационной постоянной с геодинамическими и космическими процессами. Новости геологии и геофизики // Материалы конференции. Баку, 28-30 октября 1999 г. Т.2. Баку: Сада, 1999. С.3-40.
- Халилов Э.Н. Новые данные о наличии зоны Бенъофа в Кавказско-Каспийском регионе // Азербайжан Бейнялхалг Эеофизики конгресс, Баку 19-21 октябрь, 2000. С.240.
- Халилов Э.Н. О выявлении зоны Бенъофа на Большом Кавказе и Каспии в свете новых данных // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2001. №2. С.51-54.
- Халилов Э.Н. Некоторые аспекты среднесрочного прогноза сильных землетрясений в пределах Альпийско-Гималайской системы зон Бенъофа // Физика Рийазийат йер елмляри. 2001. №1. С.39-43.
- Халилов Э.Н. К вопросу о корреляционных зависимостях вариаций гравитационной постоянной и сейсмической активности Земли // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2002. №10. С.54-59.
- Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности выделения сейсмической энергии в Альпийско-Гималайском складчатом поясе и возможности среднесрочного прогноза сильных землетрясений // АНХ. 2002. №2. С.50-55.
- Халилов Э.Н. К вопросу о корреляционных зависимостях вариаций гравитационной постоянной и сейсмической активности Земли // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2002. №2. С.54-59.
- Халилов Э.Н. О некоторых результатах экспериментальных исследований гравитационных квантовых эффектов // Материалы II межд. науч.-прак. конференции. Значение снижения влияния чрезвычайных ситуаций на интенсивное развитие экономики страны. Баку: Элм, 2003. С.63-66.
- Халилов Э.Н. Новые данные о наличии зоны Бенъофа в Кавказско-Каспийском регионе // Докл. Академии наук. 2003. Т.388. №4. С.542-544.
- Халилов Э.Н. О некоторых особенностях современной цикличности активизации магматических и грязевых вулканов мира // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2003. №6. С.54-56.

- Халилов Э.Н.* О возможном влиянии гравитационных волн на деформацию и сейсмичность Земли // Циркуляр Шамахинской Астрофизической Обсерватории. 2003, №105. С.13-21.
- Халилов Э.Н.* Устройство для регистрации гравитационных волн. Приоритетная справка, по заявке на изобретение № а 2003 0169 от 24.07.03.
- Халилов Э.Н.* О некоторых результатах гравитационных квантовых эффектах // Материалы II Междун. науч. конфер. Баку, Элм, 2003. С.64-65.
- Халилов Э.Н.* Способ регистрации низкочастотных гравитационных волн и устройство для их измерения. Международная заявка на изобретение № PCT/AZ03/00001.
- Халилов Э.Н.* Способ регистрации низкочастотных гравитационных волн, заявка на изобретение № а 20030179 от 04.08.03.
- Халилов Э.Н., Мехтиева Ш.Ф., Хаин В.Е.* Геотектоника. 1987. №2. С.54-60.
- Харгривс Дж. К.* Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. JL: Гидрометеорологический издат, 1982. 351 с.
- Хойл Ф.* Галактики, ядра и квазары. М.: Мир, 1968.
- Хокинг С.* Краткая история времени от большого взрыва до черных дыр. СПб.: Амфора, 2000. 268 с.
- Хокинг С.* Природа пространства и времени. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2000. 160 с.
- Храмов А.Н.* Магнитное поле Земли в позднем палеозое (анализ мировых палеомагнитных данных) // Известия АН СССР. Физика Земли. 1967. №1. С.86-108.
- Хромов С.П.* О некоторых спорных вопросах, относящихся к цикличности солнечной активности и ее предполагаемых связях с климатом // Метеорология и гидрология. 1973, №9.
- Цирель С.В.* О возможной зависимости вулканической деятельности от солнечной активности // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Том 3. М.: Янус-К, 2002. С.254-256.
- Чернин А.Д.* Звезды и физика. М.: Наука, 1984. 160 с.
- Чернин А.Д.* Космический вакуум//УФН. 2001. Т.171. №11. С.1153-1175.
- Чечев В.П., Крамаровский Я.М.* Радиоактивность и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1978.
- Чижевский А.Л.* В ритме Солнца. М.: Наука, 1969. 105 с.
- Чумаков Н.М.* Климатический парадокс позднего докембрия // Природа. 1992. №4. С.34-41
- Чумаков Н.М.* Периодичность главных ледниковых событий и их корреляция с эндогенной активностью Земли // Докл. Академии наук. 2001а. Т.378. №5. С.656-659
- Чумаков Н.М.* Общая направленность климатических изменений на Земле за последние 3 миллиарда лет//Докл. Академии наук. 2001б. Т.381. №5. С.652-655
- Шабетник В.Д.* Природа смещения магнитных полюсов земли // Физическая мысль России. 2000. С.98-99.

- Шалимов С.Л.* О влиянии длиннопериодных колебаний Земли на верхнюю атмосферу // Физика Земли. 1992. №7. С.89-94.
- Шама Д.В.* Современная космология: Под ред. Н.С. Кардашова. М.: Мир, 1973. 254 с.
- Шатский Н.С.* Длительность складкообразования и фазы складчатости // Известия АН СССР. Сер. геол. 1951. №1. С. 15-53.
- Шейдеггер А.Е.* Физические аспекты природных катастроф. М.: Недра, 1981. 232 с.
- Шейдеггер А.Е.* Основы геодинамики. М.: Недра, 1987.
- Шелест В.П.* - ред.: Гравитация. Проблемы. Перспективы. Киев: Наукова думка, 1972. 360 с.
- Шерман С.И.* Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесрочного прогноза землетрясений // Геофизический журнал. 2005. Т.27. №1. С.20-38.
- Широков В.А.* Общие закономерности в ориентации главных напряжений в очагах землетрясений Средиземноморского-Азиатского сейсмического пояса // Известия АН СССР. Физика Земли. 1967. №1. С.22-26.
- Широков В.А.* Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западного участка Тихоокеанской геотектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1977. С.108-116.
- Шнейер Р., Бассолото В.* Наблюдательные основы космологии. М.: Мир, 1965. 369 с.
- Штале Г.* Избранные труды. М.: Мир, 1964.
- Шульц С. С.* Тектоника земной коры (на основе анализа новейших движений). JL: Недра, 1979. 272 с.
- Щипанский А.А., Бабарина И.И., Крылов К.А.* Древнейшие офиолиты на Земле: позднеархейский суперсубдукционный комплекс Ириногорской структуры Северокарельского зеленокаменного пояса // Докл. Академии наук. 2001. Т.377. №3. С.376-380.
- Шукин Ю.К., Краснопевцева Г.В., Фирсова Д.В. и др.* Исследования Земной коры и верхней мантии сейсмоопасных зон территории СССР. М.: Наука, 1984. с. 199.
- Эйбидж.А.* Землетрясения. М.: Недра, 1982. 264 с.
- Эйгенсон М.С.* Очерк физико-географических проявлений солнечной активности. Львов, 1957.
- Эйгенсон М.С.* Солнце, погода и климат. Л., 1963.
- Эйнштейн А.* Собрание научных трудов в 4-х томах. М.: Наука, 1965.
- Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. М.: Наука, 1965. Т.1. С.642.
- Эйнштейн А., Инфельд А.* Эволюция физики. М.: Наука, 1965. 326 с.
- Яковец Ю.В.* Теория циклов Н.Д. Кондратьева // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 2. М.: Научный мир, 1998. С. 18-20.
- Яковлев О.И., Диков Ю.П.* Роль ударно-испарительной дифференциации на стадии аккреции Земли // Геохимия. 2000. №10. С.1027-1045.

- Яковлева Н.И.* К вопросы о причине квазиопериодических колебаний климата // Труды ГГО. Вып.236. 1969.
- Якубов А.А.* Грязевые вулканы западной части Апшеронского полуострова и их связь с нефтегазоносностью. Баку: АзФан, 1941. С.102.
- Якубов А.А., Али-Заде А.А., Рахманов Р.Р., Мамедов Ю.Г.* Каталог зафиксированных извержений грязевых вулканов Азербайджана (за период 1810-1974). Баку: АН Азерб.ССР, 1974. С. 33.
- Янишин А.И.* О так называемых мировых трансгрессиях и регрессиях. Бюл. МОИП. № 2, 1977.
- Abe Y.* Thermal and chemical evolution of a terrestrial magma ocean // Phys. Earth Planet. Inter. 1997. Vol.100. P.27-39.
- Abbott D.H., Drury R.* The effects of changes in subduction style over Earth history. 1. The buoyant to steep transition. 2. The unsubductable to buoyant transition // Geology. 1994. Vol.22. P.937-940.
- Abbott D.H., Hoffman S.E.* Archean plate tectonics revisited. 1. Heat flow, spreading rate, and the age of the subducting lithosphere, and their effects on the origin and evolution of continents // Tectonics. 1984. Vol.3. P.420-448
- Albarede F.* The grow of continental crust // Tectonophysics. 1998. Vol. 296. P. 1-14.
- Aleksandrov A.D.* The Space-time of the Theory of relativity, Helvetica Physica Acta, Supplement, 4, 4, 1955.
- Amelin Yu., Lee D.C., Halliday A.N., Pidgeon R.* Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons // Nature. 1999. Vol.399. P.252-255.
- Anderson D.L.* Earthquakes and the rotation of the Earth // Science. 1974. Vol.186. №4158, 49-50.
- Anderson D.L.* Hot spots, polar wander, Mesozoic convection and the geoid // Nature. 1982. Vol.297. P.391-393.
- Anderson D.L.* Superplumes or supercontinents? // Geology. 1994. Vol.22. P.39-42.
- Anderson D.L.* The thermal state of the upper mantle: no role for mantle plumes // Geophys. Res. Lett. 2000. Vol.27. N22. P.3623.
- Anderson D.L.* Plate tectonics as a far-from-equilibrium selforganized system // AGU Monograph. Plate Boundary Zones: Geodyn. series. 2002. Vol.30. P. 1-22.
- Antonov Y.V., Slusarev S. V., Chirkov V.N.* Possible reasons of temporary changes of vertical gradient of gravity // Geophysics. 2000. №4. P.45-51.
- ASTROPHYSICAL CONSTANTS, <http://pdg.lbl.gov/2000/astrophysics.pdf>.
- Australian International Gravitational Observatory (AIGO) <http://www.gravity.uwa.edu.au/AIGO/AIGO.html>
- Babcock H. W.* The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // Astrophys. J. 1961. Vol.133. №2. P.572-587.
- Bagby D.P.* Further evidence of tidal influence on earthquake incidence // Moon, 1973. Vol.6. №3-4. P.398-404.
- Ballhaus C., Ellis D.J.* Mobility of core melts during Earth's accretion // Earth Planet. Sci. Lett. 1996. Vol.143. P.137-145.

- Behram N.K., Stephan L.M., Perlmutter A.* Quantum Gravity, Generalized Theory of Gravitation and Superstring Theoiy-Based Unification // Kluwer Academyc. Plenum Publishers Hardbound, November 2000,248 p.
- Berger A., Loutre M.F., Dehant V.* Pre-Quaternary Milankovich frequencies // *Nature*. 1989. Vol.342. №6246. P.133.
- Berry M., Mair J.* Structure of the continental crust: a reconsiliation of seismic reflection and refraction studies // *Geol. Assoc. Can. Pag.* 1980. №20. P.195-213.
- Bertotti B., de Felice F., Pascolini A.* General Relativity and Gravitation. D. Reidel Publishing Company Hardbound, September 1984, 534 p.
- Boehnhardt H.* The death of a comet and the birth of our solar system // *Science*. 2001. Vol.292. P. 1307-1309.
- BossA.P.* Twin planetary systems in embryo //*Nature*. 1998. Vol.395. P.320-321.
- Bostrom R.C.* Tectonic consequences of the Earth's rotation. Oxford Univ., 2000.266 p.
- Brans C., Dicke R.H.* Mach's principle and relativistic theory of gravitation // *Phys Rev*. 1961. Vol.124. №3. P.925-935.
- Bruhn D., Groebner N., Kohlsledt D.L.* And interconnected network of coreforming melts produced by shear deformation //*Nature*. 2000. Vol.403. P.883-886.
- Bulatova N.P.* Latitudinal distribution of seismicity of the Earth depending on location of the Sun and Moon // *Volcanology and seismology*. 2005. №2. P.57-58.
- Burrows A.* Supernova explosions in the Universe // *Nature*. 2000. Vol.403. P.728.
- Burrows A., Angel R.* Direct detection at last // *Nature*. 1999. Vol.402. P.732-733.
- Byerly G.R., Lowe D.R., Wooden J.L., Xie X.* An Archean Impact Layer From the Pilbara and Kaapvaal Cratons // *Science*. 2002. Vol.297. P.1325-1327.
- Calvert A.J., Ludden J.N.* Archean continental assembly in the southern Superior province of Canada//*Tectonics*. 1999. Vol.18. №3. P.417-429.
- Cavallo G.* Interpretation of the Dirac Relationship between Fundamental Constants // *Nature*. 1973. Vol.245. P.99.
- Cawood P., Kroner A.A., Pisarevsky S.* Prekambrian plate tectonics. Criteria and evidence // *GSA Today*. 2006. Vol.16. P.4-11.
- Chance A., Kelly P.M.* An apparent periodicity in an index of volcanic activity // *Macmillan J. Ltd*. 1979. P.671-672.
- Chao B.F., Dehant V, Gross R.S., Ray R.D., Salstein D.A., Watkins M.M., Wilson C.R.* Space Geodesy Monitors Mass Transports in Global Geophysical Fluids // in press, EOS, Trans. Amer. Geophys. Union, 2002.
- Chen Ji.* Computer Simulation of Earth Movement that Spawned the Tsunami // *California Institute of Technology*. 2005.
- Chen W.Y., Stegen C.R.* Experiments with maximum entropy power spectra of sinusoids // *J. Geophys. Res*. 1974. Vol.79. P.3019-3022.
- Christian-Tollman E., TollmannA.* Der sintflut Impakt // *Mitt. Oster. Geol. Ges*. 1991. Bd.84. S.I-63.
- Ciulini I., Gorini V, Moschella U., Fre P.* Gravitational wave Series in High Energy Physics // *Cosmology and Gravitation IOP Publishing*, Jan. 2000, 412 pp.

- Condie K.C.* Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance // *Lithos*. 1989. Vol.23. №1/2. P.1-18.
- Condie K.C.* Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1998. Vol.163. P.97-108.
- Cosmology and Gravitation* // Kluwer Academic. Plenum Publishers, Hardbound, October 1980. 519 p.
- Cotton L.A.* Notes on the relations of earthquake frequency and earth tides, and their significance in the problem of earthquake forecasting // *Pan. Pacific Science Congress* 30. Tokyo, 1926, Proceedings. 1928. Vol.2. P.1511-1516.
- Courtillot V., Jaupart C., Manighetti J.* et al. On causal links between flood basalts and continental breakup // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999. Vol.166. P.177-195.
- Courtillot V., Le Mouél L.* On the long-period variations of the Earth's // *J. Geophys. Res.*, 81, 1976, p. 2941-2950.
- Cox C., Chao B.F.* Detection of large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998 // *Science*. Vol.297. №2. August 2002. P.831.
- Cribbin I.K., Plagemann S.H.* The next California earthquake // New York. Walker, 1974. 136 p.
- Crowell J.C.* Pre-Mesozoic ice ages: Their bearing on understanding of climate system // *Geol. Soc. Amer. Mem.* 192 Boulder Co. 1999. 106 p.
- Currie R.G.* A database of hydrographic stations and tools for climatological analysis // *South African J. Science*. 1973. Vol.69. P.379-383.
- Dalziel I.W.D.* Pacific margins of Laurentia and East Antarctica-Australia as a conjugate rift pair: Evidence and implications for an Eocambrian supercontinent // *Geology*. 1991. Vol.19. P.598-601.
- Dalziel I.W.D., Lawver L.A., Murphy J.B.* Plumes, orogenesis, and supercontinental fragmentation // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2000. Vol.178. №1-2. P. 1-11.
- Defant M.J., Kerezhinskas P.* Evidence suggests slab melting in arc magmas // *EOS Trans. AGU*. 2001. Vol.82. №6. P.65-69.
- De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.* Current plate motions // *Geophys. J. Int.* 1990. Vol. 101. P.425-478
- De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.* Effect of recent revisions to the paleomagnetic reversal scale of estimates of current plate motions // *Geophys. Res. Lett.* 1994. Vol.21. P.2191-2194.
- De Paolo D.J.* Strange bedfellows // *Nature*. 1994. Vol.372. P.331.
- Dercourt J., Foucault A., Renard M.* Liaison entre les phénomènes globaux, les changements du milieu et les crises du monde vivant // *Bull. Centre Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*. 1986. Vol.10. №2. P.285-311.
- De Wit M.J.* On Archean granites, greenstones, cratons and tectonics: does the evidence demand a verdict? // *Precamb. Res.* 1998. Vol. 91. P. 181-226.
- De Witt B.* Gravity: a universal regulator // *Phys. Rev. Lett.* 1964. Vol.13. P. 114.

- De Witt M.J., Roering C., Hart R.J. et al.* Formation of an Archean continent // *Nature*. 1992. Vol.357. P.553-562.
- Dicke R.H.* Phys. Mach's Principle and Invariance under Transformation of Units. *Rev.* 1962. Vol. 125. P.2163.
- Dicke R.H.* The Earth and Cosmology//*Science*. 1962. Vol.138. P. 3541.
- Dirac R.A.M.* The Cosmological Constants //*Nature*. 1937. Vol.139. P.323.
- Dirac P. A.M.* A New Basis for Cosmology // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1937. Vol.165, Issue 921. P. 199-208.
- Dirac P.A.M.* Cosmological Models and the Large Numbers Hypothesis // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1974. Vol.338. №1615. P.439-446.
- Dobrovolskiy I.L.* Gravitational precursors of tectonic earthquake // *Physics of the Earth*. 2005. №4. P.23-28.
- Doglioni C.* Geological evidence for a global tectonic polarity // *J. Geol. Soc. London*. 1993. Vol.150. P.991-1002.
- Drummond M.S., Defant M.J.* A model for trondjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol.95. №13. P.503-521.
- Drummond M.S., Defant M.J., Kepezhinskas P.* Petrogenesis of slab-derived trondjemite-tonalite-dacite-adakite magmas // *Trans. R. Soc. Edinb. Earth. Sci*, 1996. Vol.87. P.205-215.
- Durrheim R.J., Mooney W.D.* Archean and Proterozoic crustal evolution: Evidence from crustal seismology // *Geology*. 1991. Vol.19. №6. P.606-609.
- Dyson F.* Gravity. Fondation Prize Essay, 1962.
- Einstein A.* Naherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation // *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 1916. S.688.
- Einstein A.* Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie // *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 1917. S.142.
- Einstein A.* Über Gravitationswellen//*Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 1918. 1. S.154-167.
- Einstein A.* Theorie unitaire de champ physique // *Ann. Inst. H. Poincare*. 1930. 1. S.1-24.
- Einstein A.* Einheitliche Theorie von Gravitation und Elektrizität. (Mit W.Mayer) // *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math.* 1931. K1.,S. 541-557.
- Elison M. W.* Intrakontinental contraction in western North America; Continuity and episodishy // *Geol. Sol. Am. Bull.* 1991. Vol.103. №9. P. 1226-1238.
- Elsasser W.H.* Convection and stress propagation in the upper mantle // *Appl. Modern Phys. Earth Planet. Inter. N.Y.: Willey*. 1969. P.223-246.
- Evans D.A.D.* Stratigraphic, geochronological and paleomagnetic constraints upon the Neoproterozoic climatic paradox//*Am. J. Sci.* 2000. Vol.300. P.347-433.
- Excess of the duration of the day to 86400 s and angular velocity of the Earth's rotation, since 1623. <http://www.iers.org/iers/earth/>.

- Fedorov V.M.* Chronological structure and possibility of volcanic activity in connection with tidal deformation of lithosphere // *Volcanology and seismology*. 2005. №1. P.44-50.
- Fujii Y.* Dilaton and Possible non-newtonian gravity//*Nature. Phys. Sci.* 1971. Vol.234. P.5-7.
- Furukawa Y.A., Tatsumi Y.* Melting of a subducted slab and production of high-Mg andesite magmas: Unusual magmatism in SW Japan at 13-15 Ma // *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol.26. №15. P.2271-2274.
- Gamov G.* Electricity, Gravity and Cosmology // *Phys. Rev. Lett.* 1967. Vol.19. P.759.
- Garmash S. V., Lin 'kov E.M., Petrova L.N., Shved G.M.* Generation of atmospheric oscillations by seismic-gravity oscillations of the Earth // *Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys. Engl. Transl.* 1989. Vol.25. P.952-959,
- Gastil G.* The distribution of mineral data in time and space// *Amer. J. Sci.* 1960. Vol.258. P. 1-35.
- Gilluly J.* The distribution of mountain building in the geological time // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1949. Vol.60. №4. P.561-590.
- Goodwin A.M.* Precambrian Geology. L. etc.: Academic press. 1991. 556 p.
- Gravitational Waves at DAS. <http://www.das.inpre.br/~graviton/>
- Gray D.R., Foster D.A., Bucher M.* Recognition and definition of orogenic events in the Lachlan fold belt//*Austr. J. Earth Sci.* 1997. Vol.44. P.489-581.
- Greff-Lefftz M., Legros H.* // *Science*. 1999. V.286. P.1707-1709.
- Grishchuk L.P., Lipunov V.M., Postnov K.A., Prokhorov M.E., Sathyaprakash B.S.* Gravitational Wave Astronomy // Anticipation of First Sources to be detected/ *UFN*, No 1 (astro-ph|0008481). 2001.
- Gundlach J.H., Merkowitz S.M.* Measurement of Newton's Constant Using a Torsion Balance with Angular Acceleration Feedback // Department of Physics, Nuclear Physics Laboratory, University of Washington, Seattle, Washington 98195, December 10, 2001.
- Gurrie R.G.T.* *Geophys. Res.* 1966. Vol.71. №19. P.4579.
- Gutenberg N.I., Richter C.P.* Seismicity of the Earth and associated phenomena. 2nd ed. Princeton Univer. Press, Princeton. 1954. №1.
- Halliday A.N.* Terrestrial accretion rates and the origin of the Moon // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2000. Vol.176. P. 17-30.
- Halliday A.N.* In the beginning//*Nature*. 2001. Vol.409. P.144-145.
- Hambrey M.J.* The Late Ordovician-Early Silurian glacial period // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 1985. Vol.51. P.273-289.
- Hambrey M.J., Harland W.B.* The Late Proterozoic glacial era // *Ibid.* P.255-272.
- Haq B. U., Henderbol J., Vail P.P.* Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic // *Science*. 1987. Vol.235. №4793. P.1156-1166.
- Harland W.B., Herod K.N.* Glaciations through time // *Geol. J.* 1975. №6. P.189-216
- Hartmann W.K.* Giant impact on Earth seen as Moons origin // *Geotimes*. 1985. №6. P.11-12.

- Hartmann W.K., Davis D.R.* Satellite-sized planetesimals and lunar origin // *Icarus*. 1975. Vol.24. P.504.
- Hay W.W.* The cause of the Late Cenozoic Northern Hemisphere glaciations: A climate change enigma // *Terra Nova*. 1992. Vol.4. P.305-311
- Hayashi C., Nakazana K., Mizuno H.* Earth melting due to the blanketing affect of the primordial dense atmosphere // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1979. Vol.43. P.22-48.
- Heaton Th.H.* Tidai Triggering or earthquakes // *Astron. Soc.* 1975. Vol.43. №2. P.307-326.
- High Energy Physics, Cosmology and Gravitation // IOP Publishing., Jan 2001, 412 p.
- Hirshberg J.* Upper Limit of the torque of the solar wind on the Earth // *J. Geophys. Res.* 1972, Vol.77. P.4855-4857.
- Hofmann H.J.* Ediacaran remains from imtertillite beds in northwestern Canada // *Geology*. 1990. Vol.18. P. 1199-1202.
- Hoffman P.F.* Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland upside down? *Science*. 1991. Vol.252. P. 1409-1412.
- Hoffman P.F., Kaufman A.J., Halverson G.P., Schrag D.P.* ANeoproterozoic "Snowball Earth" // *Science*. 1998. Vol.282. P.1342-1346
- Hoyle F., Burbidge G., Narlikar V.J.* Different approach to Cosmology. Cambridge University Press. 2000. 357 p.
- Hoyle F., Narlikar J. V.* The Physics Astronomy Frontier. San Francisco. W.H. Freeman, 29, 1980.
- <http://www1.msfc.nasa.gov/NEWSROOM/news/releases/2002/02-> html
- <http://bowie.gsfc.nasa.gov/926/highlight/j2dot.html>
- <http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/20020801gravityfield.html>
- <http://www.aip.org/physnews/graphics/html/newgrav.html>
- [http:// gravity.uwa.edu.au/bar/bar.html](http://gravity.uwa.edu.au/bar/bar.html)
- <http://www.phy.cam.ac.uk/cavendish/view/index.asp?Picture=2>
- <http://www.aps.org/meet/APROO/baps/vpr/layp11-03.html>
- <http://the-nickel.h1.ru/album/nukes/065-1.htm>
- http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/shownh.php3?img_id=12646
- Hunter D.R.* Crustal processes during Archaean evolution of southeastern Kaapvaal province // *J. Afr. Earth Sci.* 1991. Vol.13. P.13-25.
- Hyde W.T., Crowley T.J., Barun S.K., Peltier W.R.* Neoproterozoic "Snowball Earth" simulations with a coupled climate/ice sheet model // *Nature*. 2000. Vol.405. P.425-429
- Ida S., Canup R.M., Stewart G.R.* Lunar accretion from an impact-generated disk // *Nature*. 1997. Vol.389. P.353-357.
- Ihmle P.F., Harabagia P., Jordan T.H.* // *Science*. 1993. Vol.261. P. 177.
- Ihmle P.F., Jordan T.H.* Teleseismic Search for Slow Precursors to Large Earthquake // *Science*. Vol.266. 1994. P.1547-1561.
- International Gravitational Event Collaboration. <http://igec.lnl.infn.it/>
- Jordan P.* Recent Development in General Relativity // New York. 1962. P.289.
- Jordan P.* *Schwerckraft und Weltall* // Braunschweig. 1955.

- Kasahara K.* Earthquake mechanics // Cambridge University Press, 1981, 262 p.
- Kennedy M.J., Christie-Brick N., Prove A.R.* Carbon isotopic composition of Neoproterozoic glacial carbonates as a test of paleoceanographic models for "Snowball Earth" phenomena // *Geology*. 2001. Vol.29. №2. P.1135-1138.
- Kerr R.A.* Can Great Quakes extend their reach? // *Science*. 1998. V.280. 5367. P. 1194.
- Kerr R.A.* Of ozone, teapots and snowballs // *Science*. 2001. Vol.292. P.2241-2242.
- Khain V.Y., Khalilov E.N.* About cyclic recurrence of global geodynamical processes // *Proceedings International Symposium: Cyclicity and cosmological problems*, Pirgulu, Y. Mamedaliyev settlement, 2–4 may 2003. P.91-100.
- Khain V.Y., Khalilov E.N.* Regularity of spatial-temporary distribution of volcano eruptions // *International Academy of Science. H&E. Science without borders*, Vol.1, 2003-2004, ICSD/IAS, Innsbruck. P.243-251.
- Khain V.Y., Khalilov E.N.* Rhythms of natural cataclysms and super-long gravitational waves // *Natural Cataclysms and global problems of the modern civilization. Special Edition of Transaction of the International Academy of Science. H&E. ICSD/IAS, Innsbruck, 2007*, pp. 105-118.
- Khalilov E.N.* About some aspects of inconstancy of gravitational constant // *Третий сборник Азербайджанского палеонтологического общества. Баку: Седа, 1999. С.171-174.*
- Khalilov E.N.* Some Features of Long-term Forecast on Regional Geodynamics // *Geophysics'news in Azerbaijan*, №1, Activity, 2000, 23-26 p.
- Khalilov E.N.* Features of intermediate-term forecast of severe earthquakes in the Alpine-Himalayan seismic zone // *Geophysics news in Azerbaijan*, № 1, 2001, с.24-27.
- Khalilov E.N.* The Earth is universal detector of gravitational waves // *Proceedings International Symposium: Cyclicity and cosmological problems*, Pirgulu, Y. Mamedaliyev settlement, 2-4 may 2003, p. 10-30.
- Khalilov E.N.* Doppler effects during passage of gravitational waves by cosmic objects // *Physics, Mathematics. Earth science*. №3, 2003, p.48-56.
- Khalilov E.N.* About possible influence of super long gravitational waves on duration of terrestrial day // *Proceedings International Symposium: Cyclicity and cosmological problems*, Pirgulu, Y. Mamedaliyev settlement, 2-4 may 2003, p.123-137.
- Khalilov E.N.* Cyclicity of natural calamities and cosmic factors // *Global conference: «Creation of lasting peace»*, Sao Paolo, Brazil, October, 23-25, 2002, p.372-378
- Khalilov E.N.* About logical error during designing of detectors of gravitational waves and method of its removal. About some results of gravity quantum experiments // *International Academy of Science. H&E. Science without borders*, Vol.1, 2003-2004, ICSD/IAS, Innsbruck, p. 422-435.
- Khalilov E.N.* Atropatena Torsion detector of super-long gravitational waves // *Inter. Council for Scientific development. International Academy of Science. H&E. Innsbruck, p.1-6.*

- Khalilov E.N., Khalilova T.Sh.* Cyclicity of natural calamities and cosmic factors // Proceedings Global conference: «Creation of lasting peace», Sao Paolo, Brazil, October 23-25, 2002, p.372-378.
- Kido M., Yuen D.A.* //Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V.181. P.573-583.
- Kirschvink J.L.* Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the Snowball Earth // The Proterozoic biosphere (J.W. Schopf, C. Klein - eds). Cambridge Univ. Press, 1992. P.51
- Knopoff L.* Earth tides as a triggering mechanism for earthquakes // Bull. Seismol. Soc. America. 1964. Vol.54. №6. Part A. P. 1865-1870.
- Komiya T. et al.* Plate-tectonics at 3,8-3,7 Ga: fields evidence from area, southern west Greenland // J. Geol. 1999. Vol.107. №5. P.515-554.
- Kosenko D.I., Postnov K.A.* Fluctuations of gravitational wave noise from unresolved extragalactic sources //Astron. Astrophys. 2000. Vol.355. P.1209-1213.
- Kroner A.* Contrasting evolution of Early and Late Archean granite-gneiss-greenstone terrains // Terra Abstr. 1991. Vol. 3. №1. P.198.
- Kroner A., Layer P.W.* Crust formation and plate motion in the Early Archean // Science. 1992. Vol.256. №5062. P.1405-1411.
- Kuhnt W., Chellai, E.H., Holbourn A. et al.* Morocco basin s sedimentary record may provide correlations for Cretaceous paleoceanographic events worldwide // EOS Trans. Amer. Geophys. Union. 2001. Vol.82. №33. P.361-364.
- Kumazawa M., Maruyama S.* Whole Earth tectonics // J. Geol. Soc. Japan. 1994. Vol.100. №1. P.50-59.
- Kumazawa M., Yoshida S., Ito T., Yoshioka H.* Archean-Proterozoic boundary interpreted as a catastrophic collapse of the stable density stratification in the core // J. Geol. Soc. Japan. 1994. Vol.100. №1. P.50-59
- Kusky T.M., Tucker R.D., Li J.* The Archean Dongwanzi ophiolite complex North China Craton: 2505 billion-year old oceanic crust and mantle // Science. 2001. Vol.292. P.1441-1445.
- Lehner F.K., Li V.C.* Large-scale characteristics of plate boundary deformations related to the postseismic readjustment of a thin asthenosphere // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1982. Vol.71. P.775-792.
- Lehner F.K., Li V.C., Rice J.R.* Stress diffusion along rupturing boundaries // J. Geophys. Res. Vol.86. B1. P.6155-6169.
- Le Meur H.* Le globe terrestre en boule de neige? // La Recherche. 2000. Vol.334. P. 16-17.
- Le Pichon X., Huchon Ph.* Geoid, Pangea and convection // Earth Planet. Sci. Lett. 1984. Vol.67. №1. P.123-135.
- Levin B. V.* Is the Earth core the conductor of seismic activity? // The Earth and the Universe. 2001. №3. P.12-19.
- Linde A.* Inflation and Quantum Cosmology // Stanford University Preprint ITP-878, September 1990.
- LISA - Детектор гравитационных волн от черных дыр. <http://www.univer.kharkov.ua/astron/sw/news/universe/lisa.htm>.

- Lissauer J.J.* Three planet for Upsilon Andromedae // *Nature*. 1999. Vol.398. P.659-660.
- Long D.R.* Experimental examination of the gravitational inverse square law // *Nature*. 1976. Vol.260. P. 1677-1680.
- Machado F.* A hipotese de a pulsacao de gravitacao com periode de il anos // *Garcia Orta. Ser. Geol.* 1973. Vol.1. №2. P.27-35.
- Mansinha L., Smylie D.E.* The effect of earthquake on the Chandler Wobble and the secular polar shift // *Сотр. Rond. Union Geodes. et Geophys. Internat.* 1969. №15. P. 190.
- Martin A.K.* Plate reorganizations around Southern Africa, hotspots and extinctions // *Tectonophysics*. 1987. Vol.142. №2/4. P.309-316.
- Martin H.* Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry and subduction zone magmas // *Geology*. 1986. Vol.14. №9. P.753-756.
- Martin H.* Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoid // *Lithos*. 1999. Vol.46. P.411-429.
- Marsan D., Lengline O.* Extending Earthquakes reach Through Cascading // *Science*. 2008. Vol.319. №5866. P.1076-1079.
- Maruyama S., Santosh M., Zhao A.* Superplume, Supercontinent, and postperovskite: Mantle dynamics and anti-plate Tectonics in the Core-Mantle Boundary // *Gondwana Research*. 2007. P.7-37.
- Matsui T., Abe I.* Impact-induced atmosphere and oceans on Earth and Venus // *Nature*. 1986. Vol.122. P.526-528.
- Mbelek J.P., Lachize-Rey M.* Possible evidence from laboratory measurements for a latitude and longitude dependence of G. Service d'Astrophysique, C.E. Saclay F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France, April 19, 2002.
- Meert J.G., van der Voo R.* The Neoproterozoic (1000-540 Ma) glacial intervals: no more snowball Earth // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1994. Vol.123. P. 1-13
- Mei, Shi-yun.* Characteristics of earthquake activity in China // *Acta Geophys. Sin.* 1960. Vol.9. №1. P. 19.
- Miall A.D.* Exxon global cycles chart: An event for every occasion? // *Geology*. 1992. Vol.20. №9. P.787-790.
- Mikhaylov V.O., Tikhotskiy S.A., Diaman M., Pane I.* Researching of the possibility of finding out and studying of variations of gravity of geodynamic origin on modern satellite gravimetric data // *Physics of the Earth*. 2005. №3. P. 18-32.
- Milne E.A.* // *Proc. Roy. Soc.* 1937. Vol.A158. P.324.
- MiniGRAIL Gravitational Radiation Antenna In Leiden, <http://www.minigrail.nl/main.html>
- Mogi K.* Monthly diastribution of large earthquakes in Japan // *Bull. Earthquakes Ross. Inst., Univer., Tokyo*. 1969. Vol.47. №3. P.419-427.
- Mojzsis S.J., Harrison T.M., Pidgeon R.T.* Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4, 300 MYR ago // *Nature*. 2000. Vol.409. P. 179-181.

- Moore E.M.* The southwest US - East Antarctic (SWEAT) connection: A hypothesis // *Geology*. 1991. Vol.19. P.425-428.
- Morgan R.* Cosmological Upper Limit on Time Variation of G // *Nature*. 1971. Vol.232. P. 109.
- Morgan R.* Curved space Geophysical Bounds of the Time Variations of G // *Nature Phys. Sciences*. 1972. Vol.237. №74. P.70.
- Munk W.H., MacDonald G.J.F.* The Rotation of the Earth. Cambridge, 1960.
- Nadai A.* Theory of flow and fracture of solids. V.2. N.Y.: McGraw-Hill, 1963. 868 p.
- Nagasawa K.* Sokuchi gakkaiishi // *J. Geod. Soc. Jap.* 1973. Vol.19. №4.
(Русский перевод: А.Надаи. Пластичность и разрушение твердых тел. Т.2., М.: Мир, 1969).
- Nance R.D., Worsley T.R., Moody J.B.* The supercontinent cycle // *Sci. Amer.* 1988. Vol.259. P.44-51.
- Narlikar J. V.* Lepton Creation and the Dirac Relationship between Fundamental Constants // *Nature*. 1974. Vol.247. P.99.
- Narlikar J.V.* The Structure of the Universe. Oxford University Press, 1977.
- NASA, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>
- Nedervari P.* Tidal forces and earthquakes // *J. Internal Lunar Soc.* 1964. Vol.2. №5. P. 136-142.
- Nolting F., Schurr J., Schlamminger St., Kindig W.* Determination of the gravitational constant G by means of a beam balance // *Institute of Physics, University of Zurich, Zurich, Switzerland. Europhysics News*. 2000. Vol.31 №4.
- Nutman A.P., Friend C.R.L., Bennett V.C.* Review of the oldest (4400-3600 Ma) geological and mineralogical record: Glances of the beginning // *Episodes*. 2001. Vol.24. №2. P.93-102.
- Ohtani E.* Chemical stratification of the mantle formed by melting in the early stage of the terrestrial evolution // *Tectonophysics*. 1988. Vol.154. P.201-210.
- Okuda T., Naito J., Onodera E.* // *Proct. Intern. Lat. Observ. Nisusawa*. 1973. №13. P. 144-158.
- Palike H., Norris R.D., Herrle J.O., Wilson P.A., Coxall H.K., Lear C.H., Shackleton N.J., Tripathi A.K., Wade B.S.* The heartbeat of the Oligocene climate system // *Science*. 2006. Vol.314 (5807). P. 1894-1898.
- Pariyskiy N.N.* Irregular changes of gravity and rotation of the Earth // *Letters to the Astronomical J.* 1982. Vol.8. №6. P.378-380.
- Pariyskiy N.N.* About irregular changes of the speed of rotation of the Earth and their possible connection with the deformations of the Earth and changes of gravity. The problems of widening and pulsation of the Earth // *Science*. 1984. P.84-93.
- Piper J.D.A.* The Neoproterozoic supercontinent: Rodinia or Palaeopangaea? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2000. Vol.176. P. 131-146.
- Piper J.D.A., Grant S.A.* Paleomagnetic test of the axial dipole assumption and implications for continental distribution through geological time // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1989. Vol.55. P.37-53.

- Postnov K.A., Prokhorov M.E.* Binary black hole formation and mergings // *Rencontres de Moriond Workshop Series*, vol. 34, World Publishers, Hanoi, 2000, p. 113-118.
- Rainbird R.H., Stern R.A., Khudoley A.K.* et al. U-Pb geochronology of Riphean sandstones and gabbro from southern Siberia and its bearing on the Laurentia-Siberia connection // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1998. Vol.164. P.409-420.
- Rampino M.R.* EOSTranc Amer. Geophys Union. 1985. Vol.6. №3. P.23.
- Rapp R.P., Shimizu N., Norman M.D., Applegate G.S.* Reaction between slabderived melts and peridotite in the mantle wedge. Experimental constraints at 3.8. Ga // *Chem. Geol.* 1999. Vol.160. P.335-356.
- Rapp R.P., Watson E.B., Miller C.F.* Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondjemites and tonalities // *Precamb. Res.* 1991. Vol.51. P. 1-25.
- Reid H.F.* The mechanics of the earthquake // *The California Earthquake of April 18, 1906. Report of the State Earthquake Investigation Commission*, 2. Carnegie Institution of Washington, D.C., 1910, 192 p.
- Rice J.R.* The mechanics of earthquake // *Phys. Earth Inter.* Amsterdam: Nort-Holland. 1980. 215 p. (Райе Дж. Механика очага землетрясений. Мир.: 1982).
- Rice J.R., Gu Ji-Cheng.* Earthquake aftereffects and triggering seismic phenomena // *Pure and Appl. Geophys.* 1983. Vol.121. №2. P.187-219.
- Ringwood A.E.* Origin of the Earth and Moon. N.-Y. etc.: Sprihger, 1979, 295 p.
- Rudenko V.N.* New approach to the gravitational wave experiment // *Gravitational Waves and Experimental Gravity. Moriond Workshop Series*. 2000. Vol.34. P.269-275.
- Runnegar B.* Paleoclimate: Loophole for snowball Earth // *Nature*. 2000. Vol.405. P.403-404
- Russel S.S.* The formation of the Solar System *Hi. Geol.* London. 2007. Vol.164. P.481-492.
- Ryall A., Vanwormer I.D.* Triggering of microearthquakes by earth tides, and other features of the Truckee, California, earthquake, sequence of September, 1966 // *Bull. Seismic. Soc. America*. 1968. Vol.58. №1. P.215-248.
- Sakurai Y., Sein O.* Shoichi, Chishi, Tadanao. Mesurement of Earth strains with a laser interferometer//*Jap. J. Appl. Phys.* 1976. Vol.15. №9. P.1859-1860.
- Salarn A., Strathdee J.* Quantum gravity and infinities in quantum electrodynamics // *Preprint IC/70/38, Trieste*, 1970.
- Salwi D.M.* Large earthquakes wobble Earth // *Sci. Report*. 1977. №3. P. 176-178.
- Sanchez N., Zichichi A., de Sabbata V.* Gravitational and Modern Cosmology // *Kluwer Academic. Plenum Publishers, Hardbound*, 1992, 228 p.
- Sanjeev Dhurandhar, Thanu Padmanabhan. *Gravitation and Cosmology* // *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hardbound*, April 1997, 316 p.
- Satellite Laser Ranging and Earth Science. NASA Space Geodesy Program, www.ilrs.gsfc.nasa.gov
- Saulson P.R.* Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors // *World Scientific Publishing Co*, Oct. 1994, 316 p.

- Şengür A.M.C.* Timing of orogenic events: A persistent geological controversy // Controversies in modern geology. N.-Y.: Acad. Press, 1991. P.405-473.
- Schaffner S.* John Michell and Black Holes // Journal for the History of Astronomy. 1979. Vol 10. P.42.
- Schatzman E.* Sur la nouveau regime de rotation de la Terre, etabli en juillet, 1959 // Ann. Geophys. 1960. Vol.16. P.495-506.
- Schawan W.* Hoherunkte der Geodynamik bei alpinotyper Orogenese und bei Ocean-floor spreading bzw. Plattebewegungen // Ztschr. Dt Geol.Ges.1977.Bd.128.s. 143-152.
- Schawan W.* The worldwide active Middle/Late Eocene geodynamic episode with peaks at + 45 and +37 m.y. B.P. and implications and problems of orogeny and sea-floor spreading//Tectonophysics. 1985. Vol.115. P.197-234.
- Schneider I.* Enfin un autre systeme solaire // La Recherche. 1999. Vol.321. №6. P.28-29.
- Schuster A.* On the investigation of hidden periodicities, Terrestr, Magn, 3 , 1898, 13-14.
- Schuster A.* The periodogramm and its optimal analogic // Roc. Roy. Soc. 77 (1906), 136.
- Schutz B.E* Gravitational wave data analysis // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Dyffryn House, StNicholas, Cardiff, Wales, july 6-9, 1987, Dept. of Applied Mathematics and Astronomy, University College, Cardiff, Wales, UK.
- Shepherd D.S., Claussen M.J., Kurtz S.E.* Evidence for a solar system-size accretion disk around the massive protostar G 192. 16-3.82 // Science. 2001. Vol.292. P. 1513-1518.
- Sheridan R.E.* Pulsation tectonics as a control the dispersal and assembly of supercontinents // J. Geodyn. 1997. №3-4. P. 173-196.
- Shimshoni M., Dishon M.* On the cause of sidereal periodicities ties in earthquake occurrences // J. Geophys. Res. 1975. Vol.80. №32. P.4497-4498.
- Shlien S.* Earthquake - tide correlation // Geophys. J. Roy. Istron. Soc. 1972. Vol.28. №1. P.27-34.
- Simkin T. et al.* Volcanoes of the World. Stroudsburg, Renn., USA: Hutchinson Ross Publ. Corp., 1981,233 p.
- Simpson A., Khalilov E.* About some results of gravity quant experiments // International Academy of Science. H&E. Science Without Borders, Vol.1, 2003-2004, ICSD/IAS, Innsbruck, pp. 292-294.
- Simpson A., Khalilov E.* Development of quantum gravitation // Science Without Borders. Transactions of the International Academy of Science. H&E. 2005/2006. Vol.2. P.319-339.
- Simpson I.F.* II Earth Planet. Sci. Lett. 1968. Vol.3. P. 147.
- Simpson I.F.* Earth tides a triggering mechanism for earthquakes // Earth and Planetary Sci. Lett. 1967. Vol.2. №5. P.473-478.
- Simpson I.F* Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes // Earth and Planet. Sci. Lett. 1968. Vol.3. №5, P.417-425.

- Slaucitaja L.* Observ. astr. nas. Plata. Ser. geophys., Affolter H.R., 1966, p.4
- Slaucitajsa L.* Periodicities in geomagnetic secular variation at Hololulu // Hawaii Inst. Geophys. Univ., 6, 1966. P.1.
- Smith W.D.* The application of finite element analysis to body wave propagation problems // Geophys. J.R. Astron. Soc. 1974.42. P.747-768.
- Smithies R.H.* The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series are not an analogue of Cenozoic adakite // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. Vol.182. P.115-125.
- Smithson S.B.* Modeling continental crust: structural and chemical constraints // Geophys. Res. Lett. 1978. Vol.5. P.749-752.
- Smithson S.B.* Deep crustal structure and genesis from con - Johnson R.A., trusting reflections: an integrated approach Hurich C.A. // Geophys. J. Royal Astr. Soc. 1987. Vol.89. P.67-72.
- Sorokhtin O.G.* Early stages in the development of the Earth-Moon systems // Astron. Astrophys. Transactions. 2001. Vol.19. P. 817-845.
- Spudis P.D.* What is the Moon made of ? // Science. 2001. Vol.293. P. 1779-1781.
- Stacey F.D.* Gravity. Sci. Progr. Oxf., 1984, v.69., p.1-17.
- Stacey F.D., Tuck G.J.* Geophysical evidence for non - newtonian gravity // Nature. 1981. Vol.292. P.230-238.
- Starostenko V.I., Geiko V.S. Kendzera A. V. et al.* The disastrous earthquake of 26 December 2004 near the shores of Sumatra: reasons, consequences, lessons. Geophysical Journal. 2005. Vol.27. №6. P.940-961.
- Stakhovsky I.R., Belousov T.R.* Statistical relations between scaling characteristics of fault and seismic fields // Journal of Earthquake Prediction Research. 1996. Vol.5. №4. P.505-524.
- Stevenson D.J.* Jupiter and its moons // Science. 2001. Vol.294. P.71-74.
- Stille H.* Grundfragen der vergleichenden Tektonik. 1924.
- Stille H.* Nochmals die Frage der Episodizität und Gleichzeitigkeit der orogenen Vorgänge // Geol. Rdsch. 1950. Bd. 38. H.2.
- Stoyko A., Stoyko N.* Rotation de la terre, phenomenes geophysiques et activite du soleil // Bull. Cl. Sci. Acad. Poy. Belg. 1969, t.55. P.279-285.
- Tackley P.J.* Mantle convection and plate tectonics: Toward an integrated physical and chemical theory // Science. 2000. Vol.288. P.2002-2007.
- Takagi S.* The earthquakes are not produced by occurrence of fault // Pap. Meteorol. and Geophys. 1974. Vol.25. №2. P.111-123.
- TAMA300* The 300m Laser Interferometer Gravitational Wave Antenna. <http://tamago.mtk.nao.ac.jp/>
- Taylor S.R., McLennan S.M.* The geochemical evolution of the continental crust // Rev. Geophys. 1995. Vol.33. P.241-265.
- Teller E.* On the change of Physical Constants // Phys. Rev. 1948. Vol.73. P.801.
- Thorne K.S.* In 300 years of Gravitation (Eds S.M. Hawking, W. Israel) Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987.

- Thorne K.S.* Black holes and time warps. Einstein's Outrageous Legacy. W.W.Norton company. New York-London, 1994, 619 p.
- Thorne K.S.* Proc. Conf. in Memory of Chandrasekhar (Ed. R. Wall). Chicago: Univ. of Chicago Press, 1997.
- Thorne K.S., Kenan W.R.* Gravitational Radiation: A New Window onto the Universe. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1988.
- Trumpler R.* The timing of orogenic events in the Central Alps // Gravity and tectonics. N.-Y.: Wiley, 1973. P.229-251.
- USGS Earthquakes Hazards Program. Significant Earthquakes of the World for 1985–2000. http://neic.usgs.gov/neis/eglists/sig_19.... (1985-2003). <http://zhurnal.aep.relarn.ru/articles/2001/081.pdf>
- Vail P.R., Mitchum P.M., Todd R.G. et al.* Seismic stratigraphy and global changes of sea level // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 1977. №26. P.49-212.
- Valzer U., Hendel R.* Tectonic episodicity and convective feedback mechanism Earth Planet. Sci. Lett. 1997. Vol.100. P. 167-188.
- Vanden Berg A.H.M.* Timing of orogenic events in the Lachlan orogen // Austr. J. Earth Sci. 1999. Vol.46. P.691-701.
- Veilleux S., Cecil G., Bland-Hawthorn J.* Colossal Galactic explosions // Sci. Amer. 1996. №2. P.98-103.
- Volodichev N.N., Podorolskiy A.N., Levin B. V., Podorolskiy V.I.A.* Correlation of appearance of big series of earthquakes with the time of phases of new moon and full moon // Volcanology and seismology. 2001. №1. P.60-67.
- VIRGO Home Page, <http://www.virgo.infn.it/central.html>
- Wichman R. W., Schultz P.H.* A model for crustal subduction by large impact // Lunar et Planet. Sci. Abstr. Pap. Conf. Mart 12-16. Houston (Texas), 1990, vol. 21, p.1331-1332.
- Wilde S.A., Valley J.W., Peck W.R., Graham C.M.* Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and ocean on the Earth 4.4 Gyr ago // Nature. 2001. Vol.409. P.175-179.
- Wilson J. T.* Hypothesis of Earth's behavior // Nature. 1963. Vol.198. P.925-929.
- Wolszcan A., Frail D.A.* A planetary system around the millisecond pulsar PSR 1257+12 // Nature. 1992. Vol.355. P.145-147.
- Worsley Th.R., Kidder D.L.* First-order coupling of paleogeography and CO₂ with global surface temperature and its latitudinal contrast // Geology. 1991. Vol.19. P.1161-1164.
- Yale L., Carpenter S.J.* Large igneous provinces and great dike swarms: proxies for supercontinent cyclicity and mantle convection // Earth Planet. Sci. Lett. 1998. Vol.163. P. 109-122.
- Young G.M., Brunn V. Von, Gold D.J.C., Minster W.E.L.* Earth's oldest reported glaciation: physical and chemical evidence from the Archean Mozaan group (~2,9 Ga) of South Africa // J. Geol. 1998. Vol.106. P.523-538.

Zakharov A.F., Sazhin M. V. Gravitational lenses as natural amplifiers of gravitational radiation // Proceedings of XXXIV Rencontres de Moriond «Gravitational Waves and Experimental Gravity». World Publishers, 2000, p.269-275.

Zelter B.D. The contribution of earth tides to earth-quakes // ESSA Symposium on earthquakes prediction Rockville. Md. 1969, Washinton, p.35-37.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ЗЕМЛЕ

Земля является третьей планетой от Солнца и крупнейшей из 4-х внутренних планет, имеющих схожую с земной внутреннюю структуру. В процессе ее движения по орбите вокруг Солнца плоскость земного экватора (наклоненная к плоскости орбиты на угол $23^{\circ}45'$) перемещается параллельно самой себе таким образом, что в одних участках орбиты земной шар наклонен к Солнцу своим северным полушарием, а в других - южным. Это и является причиной смены времен года. Расстояние от Земли до Солнца в различных точках орбиты неодинаковые, в перигелии (3 января) оно приблизительно на 2,5 млн. км меньше, а в афелии (3 июля) - на столько же больше среднего расстояния, составляющего 149,6 млн. км. Большую часть поверхности Земли занимает Мировой океан (361 млн. км², или 71%), суша составляет 149 млн. км² (29%).

Средняя глубина Мирового океана - 3900 м. Существование осадочных пород, возраст которых (по данным радиоизотопного анализа) превосходит 3,7 млрд. лет, служит доказательством существования на Земле обширных водоемов уже в ту далекую эпоху, когда предположительно появились первые живые организмы. Форма Земли, как известно, близкая к шарообразной, при более детальных измерениях оказывается очень сложной, даже если обрисовать ее ровной поверхностью океана (не искаженной приливами, ветрами и течениями). Такая поверхность называется геоидом. Геоид (с точностью порядка сотен метров) совпадает с эллипсоидом вращения, экваториальный радиус которого 6378 км., а полярный радиус на 21,38 км. меньше экваториального. Разница этих радиусов возникла за счет центробежной силы, создаваемой суточным вращением Земли.

Одна из особенностей Земли как планеты - ее магнитное поле, благодаря которому мы можем пользоваться компасом. Магнитный полюс Земли, к которому притягивается северный конец стрелки компаса, не совпадает с Северным географическим полюсом, а находится в пункте с координатами приблизительно 76° с.ш. 101° з.д. Магнитный полюс, расположенный в южном полушарии Земли, имеет координаты 66° ю.ш. и 140° в.д. (в Антарктиде). Кроме того, ось магнитного поля проходит не через центр Земли, а в стороне от него на 430 км. Магнитное поле Земли несимметрично. Под действием исходящего от Солнца течения плазмы (солнечного ветра) магнитное поле Земли искажается и приобретает «шлейф» в направлении от Солнца, который простирается на сотни тысяч километров.

Полюса нашей планеты постоянно находятся в движении. Объясняется это не только прецессией оси гироскопа. Наша планета окружена обширной атмосферой, которая, благодаря присутствию небольшого озонового слоя, нейтрализует опасное для жизни коротковолновое солнечное и космическое излучение. Из-за содержащегося в атмосфере углекислого газа на нашей планете имеет место парниковый эффект. Он проявляется не так сильно, как на *Венере*, но все же поднимает среднюю (равновесную) температуру на Земле с теоретических минус 23 до плюс 15. Действуя подобно хорошей одежде, атмосфера оберегает земную поверхность и от температурных перепадов. В отсутствие атмосферы в некоторых точках Земли температура в течение суток колебалась бы между 160 жары и 100 градусами мороза.

Основными газами, входящими в состав нижних слоев атмосферы Земли, являются азот (-78%), кислород (-21%) и аргон (-1%). Других газов в атмо-

сфере Земли очень мало, например, углекислого газа около 0,03%. Атмосферное давление на уровне поверхности океана составляет при нормальных условиях ~0,1 МПа. Полагают, что земная атмосфера сильно изменилась в процессе эволюции: обогатилась кислородом и приобрела современный состав в результате длительного химического взаимодействия с горными породами и при участии биосферы, то есть растительных и живых организмов.

Принято считать, что древняя атмосфера произошла из газообразных продуктов вулканических извержений; о ее составе судят по химическому анализу образцов газа, «замурованных» в полости древних горных пород. В исследованных образцах, возраст которых более 3,5 млрд. лет, содержится приблизительно 60% углекислого газа, а остальные 40% - это соединения серы (сероводород и сернистый газ), аммиак, а также хлористый и фтористый водород. В небольшом количестве были найдены азот и инертные газы. Доказательством того, что в земной атмосфере в течение первых 4 млрд. лет ее существования не было свободного кислорода, являются обнаруженные в геологических пластах соответствующего возраста чрезвычайно легко окисляемые, но не окисленные вещества. такие, как сернистый натрий. Кислород, который выделялся в ничтожном количестве из водяного пара под действием солнечного облучения, полностью затрачивался на окисление содержащихся в атмосфере горючих газов: аммиака, сероводорода, а также, вероятно, метана и окиси углерода. В результате окисления аммиака освобождался азот, который постепенно накапливался в атмосфере. 600 млн. лет назад количество свободного кислорода в земной атмосфере достигло 1% от его современного содержания. В это время уже существовало значительное число различных примитивных одноклеточных живых организмов. Около 400 млн. лет назад, содержание свободного кислорода в земной атмосфере стало быстро увеличиваться, благодаря широкому распространению зарослей крупных растений, характерных для этой эпохи.

В результате естественного распада радиоактивных элементов и некоторых других процессов в недрах Земли в течение долгого времени выделялась и накапливалась тепловая энергия. Это привело к сильному разогреву и частичному расплавлению вещества в недрах и к постепенному формированию и росту центрального ядра из наиболее тяжелых элементов и наружной коры из менее плотных веществ.

О внутреннем строении Земли прежде всего судят по особенностям прохождения сквозь различные слои Земли сейсмических волн, возникающих при землетрясениях или взрывах. Ценные сведения дают также изменения величины теплового потока, выходящего из недр, результаты определений общей массы, момента инерции и полярного сжатия нашей планеты.

Масса Земли найдена из экспериментальных измерений физической постоянной тяготения и ускорения силы тяжести (на экваторе ускорение силы тяжести равно 978,05 гал; 1 гал = 1 см/с²). Для массы Земли получено значение 5,976·10²⁴ кг., что соответствует средней плотности вещества 5517 кг/м³. Определено, что средняя плотность минералов на поверхности Земли приблизительно вдвое меньше средней плотности Земли. Из этого следует, что плотность вещества в центральных частях планеты выше для всей Земли. Полученный из наблюдений момент инерции Земли, который сильно зависит от распределения плотности вещества вдоль радиуса Земли, свидетельствует также о значительном увеличении плотности от поверхности к центру.

Поток тепла из недр, различный в разных участках поверхности Земли, в среднем близок к 1,6·10⁻⁶ кал·см⁻²·сек⁻¹, что соответствует суммарному выходу энергии 10²⁸ эрг в

год. Поскольку тепло может передаваться только от более нагретого к менее нагретому веществу, температура вещества в недрах Земли должна быть выше, чем на ее поверхности. Действительно, согласно измерениям, проведенным в шахтах и буровых скважинах, температура повышается приблизительно на 20° на каждый километр глубины. У нижней границы мантии давление достигает 130 ГПа, температура там не выше 5 000К. В центре Земли температура, возможно, поднимается до 10 000К.

Собственные колебания Земли. В 1911 году математик Ляв (Love) вычислил период собственных колебаний стального шара размером с Землю. Оказалось, что он будет равен одному часу. Первые собственные колебания Земли с периодом 57 мин обнаружены Беньоффом в 1952 году, после землетрясения на Камчатке. Зарегистрированы колебания Земли с периодом 54 мин после чилийского землетрясения в 1960 году. Поскольку Земля - не однородный стальной шар, а имеет значительно более сложное строение, то и собственные колебания имеют достаточно богатый спектр.

Существуют два типа собственных колебаний упругого шара, которые называют модами. Сфероидальные колебания дают моду S (с периодом 54 мин, что на 6 мин меньше теоретического значения, полученного Лявом. Это отличие указывает, прежде всего, на отличие Земли от однородного стального шара), а крутильные колебания - моду T . Этому крутильному колебанию соответствует только одна поверхность, секущая поверхность Земли по экватору. При этом северное и южное полушария смещаются в противоположные стороны. Среди других мод (своего рода гармоник) существуют и такие, период которых значительно отличается от теоретического. Собственные колебания - прекрасный материал для тестирования принятой модели Земли. Они могут быть вычислены заранее, теоретически. С другой стороны, они могут быть определены путем наблюдений, с использованием, например, того факта, что сила тяжести зависит от высоты точки, где она наблюдается. Вертикальный градиент силы тяжести составляет приблизительно 300 мкГал/м. Заметим, что 1 мкГал составляет приблизительно 10^{-9} g. Изменение высоты всего на 1 мм вызывает изменение силы тяжести на 0,3 мкГал. Сейчас существуют приборы, способные зарегистрировать значительно меньшие изменения силы тяжести - это криогенные гравиметры. Сопоставление теоретических и наблюдательных данных дает основание принять решение о правильности или ошибочности принятой модели. На основе всего комплекса современных научных данных и построена модель внутреннего строения Земли, которая хорошо удовлетворяет измеренным значениям всех перечисленных выше параметров.

МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ (ПО БУЛЛЕНУ)

Зона	Наименование слоя	Глубина(км)	Плотность (г/см ³)
A	кора	35	3,2
B	силикаты	400	3,5
C	фазовые переходы	900	4,0
D	нижняя мантия	2700	5,0
D'	переходная зона	2883	
E	внешнее ядро	4980	10-11
F	переходная зона	5120	
G	внутреннее ядро	6371	12

Зоны В и С образуют так называемую верхнюю мантию, а зона D - нижнюю мантию. Мантия Земли состоит из силикатных пород. По мере увеличения давления и температуры в веществе происходят фазовые переходы: определенные виды пород из твердой фазы переходят в жидкую. Такие фазовые переходы отмечены в зоне С и в зоне D'. Причем в последнем случае весь металл выплавляется, и внешнее ядро (зона E) целиком состоит из расплавленного металла. Через эту зону поперечные волны не проходят, так как модуль сдвига равен нулю. В переходной зоне F жидкая фаза металла переходит в твердую фазу, и внутреннее ядро состоит из твердого металла с плотностью 12. Но полагают, что, если изменить физические условия и поместить этот металл в условия «нормальных» температуры и давления, его плотность окажется равной 7.

Твердая оболочка Земли называется литосферой. Литосфера Земли состоит из нескольких крупных блоков - литосферных плит, медленно перемещающихся одна относительно другой в горизонтальной плоскости. По их границам концентрируется подавляющее большинство очагов землетрясений. Верхний слой литосферы — эта земная кора, минералы которой состоят преимущественно из окислов кремния и алюминия, окислов железа и щелочных металлов. Земная кора имеет неравномерную толщину: 35-65 км на континентах и 6-8 км под дном океанов.

Верхний слой земной коры состоит из осадочных пород, нижний - из базальтов. Между ними находится слой гранитов, характерный только для континентальной коры. Под корой расположена так называемая мантия, имеющая иной химический состав и большую плотность. Граница между корой и мантией называется *поверхностью Мохоровичича*. В ней скачкообразно увеличивается скорость распространения сейсмических волн.

На глубине 120-250 км под материками и 60-400 км под океанами залегает слой мантии, называемый астеносферой. Здесь вещество находится в близком к плавлению состоянии, вязкость его сильно понижена.

Все литосферные плиты как бы плавают в полужидкой астеносфере, как льдины в воде. Более толстые участки земной коры, а также участки, состоящие из менее плотных пород, поднимаются по отношению к другим участкам коры. В то же время дополнительная нагрузка на участок коры, например, вследствие накопления толстого слоя материковых льдов, как это происходит в Антарктиде, приводит к постепенному погружению участка. Такое явление называется изостатическим выравниванием.

Ниже астеносферы, начиная с глубины около 410 км, «упаковка» атомов в кристаллах минералов уплотнена под влиянием большого давления. Резкий переход обнаружен сейсмическими методами исследований в 1906 году на глубине 2880-2920 км. Выше этой отметки плотность вещества составляет 5560 кг/м^3 , а ниже ее - 10080 кг/м^3 . Здесь начинается земное ядро, или, точнее говоря, внешнее ядро, так как в его центре находится еще одно - внутреннее ядро, радиус которого 1250 км. С существованием жидкого внешнего ядра связывают происхождение магнитного поля Земли.

Граница раздела внешнего ядра характерна тем, что на ней резко падает скорость продольной волны от 13,6 км/с до 8,1 км/с. Поперечная волна вообще через внешнее ядро не проходит, что говорит о том, что оно жидкое. Твердое, внутреннее ядро обнаружила Леман (Дания) в 1936 году. Она показала, что оно расположено на глубине приблизительно 5000 км.

Гравитационные аномалии. Термин *аномалии* означает отклонения от некоторой «нормы», т.е. значения, которое можно предсказать, вычислив его по формуле. Вычис-

ленное значение силы тяжести называют «нормальным», а наблюдаемое - аномальным. Если принять Землю равновесным эллипсоидом вращения, со сжатием, вычисленным по спутниковым данным 1:298,256, то значение силы тяжести можно вычислить по формуле, принятой Международным Геофизическим и Геодезическим союзом на своей Генеральной Ассамблее в августе 1971 года.

Известно, что сила тяжести зависит от высоты точки наблюдения. Наблюдения производятся в крайнем случае на уровне моря, то есть на высоте, равной нулю. Все сухопутные определения силы тяжести выполняются на разных высотах. Так как поверхность эллипсоида не совпадает с поверхностью уровня моря, разработана теория приведения гравитационной аномалии (редукции) к одной и той же поверхности. Кроме того, сила тяжести зависит и от масс, лежащих между эллипсоидом и геоидом. Чтобы учесть и эти факторы, развита теория геологических редукций. В таком случае, вместе с гравитационными аномалиями, обязательно должен указываться и вид редукций, с которыми данная аномалия вычислена. Существуют аномалии *в свободном воздухе*, аномалии *Фая*, аномалии *Буге*, изостатические аномалии и т. п.

Гравитационные аномалии на Земле, как правило, меньше 100 мГал (1 Гал = $1\text{см}/\text{с}^2$), их среднеквадратическая вариация по Земле составляет около 20 мГал. Следовательно, гравитационное поле Земли достаточно гладкое. Для экстремальных условий (островные дуги, глубоководные впадины) гравитационные аномалии достигают величины 400 мГал, что в 12,5 раз меньше разницы в значениях силы тяжести на полюсе и экваторе, и составляют всего 0,04% от величины силы тяжести. Поэтому для получения данных, по которым можно судить о внутреннем строении нашей планеты, необходимо изучать аномалии на уровне не только миллигалов, но и микрогалов, чего и добиваются геофизики. Другой характеристикой гравитационного поля является отклонение отвесной линии (вертикали) от нормали к эллипсоиду. Это отклонение невелико и составляет секунды дуги. Геодезические работы в Индии близ горного массива Гималаев показали, что координаты астрономических пунктов из-за отклонений отвесной линии отличаются от геодезических на 5,2", тогда как вычисленное отклонение, связанное с притяжением гор, составляет 27,9". Для объяснения этого явления английский геодезист Пратт высказал мысль, что под горами плотность пород гораздо меньше, чем у коренных пород под равнинами. Иными словами, если все породы разбить на блоки, то плотность этих блоков должна зависеть от их толщины: чем толще блок, тем меньше плотность. При этом вес всех блоков на некоторой поверхности, называемой поверхностью компенсации, один и тот же. Вся земная кора, таким образом, находится в равновесии. Эта гипотеза Пратта получила название изостатической. Французский геодезист Эри предложил более правдоподобную схему: земные блоки, по Эри, подобно айсбергам на море, плавают на более плотной, но и более пластичной среде - верхней мантии. В этом случае, так же как и у айсбергов, должна образоваться под горными массивами «подводная часть» с плотностью меньшей, чем плотность вмещающих пород. Таким образом, эффект гравитационной компенсации должны создавать корни гор, существование которых сейсмологи подтверждают.

Геофизики применяют все доступные им методы для изучения глубинного строения Земли, прежде всего сейсмологический и гравиметрический. По современным представлениям, земная кора имеет разную толщину в разных регионах. В горах толщина ее достигает 60 и более километров. Состоит она из разных слоев. Большой объем занимают кислые (гранитные) породы с плотностью 2,67. Равнины покрыты осадочными породами, толщиной несколько километров и с плотностью 2,2. Ниже этих слоев лежат

СТРОЕНИЕ И СОСТАВ ЗЕМЛИ

Слой	Толщина, км	Состав
Кора	6-10	Твердые силикатные породы
Мантия	2800	В основном, твердые силикатные породы
Внешнее ядро	2300	Расплавленные железо и никель
Ядро (радиус)	1200	Твердые железо и никель

основные породы - базальты с плотностью 2,8. Толщина коры для равнинных регионов равна 30 км. Горные районы и равнины образуют основные морфологические особенности континентов. При переходе к океану, гранитный слой постепенно выклинивается, а осадочные породы, покрывают на абиссальных котловинах, в основном, базальтовые породы. При этом, толщина коры становится меньше и, в среднем, составляет 10-15 км. Особенно тонкой кора становится в глубоководных впадинах (4-5 км).

ОСНОВНЫЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ТЕРМИНЫ

АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ (АГВ) представляют собой распространение в атмосфере и ионосфере волнообразных возмущений естественного и искусственного происхождения. Примером естественных возмущений являются АГВ, распространяющиеся из авроральной области в средние широты.

В период возмущений в высоких широтах АГВ дают косвенную информацию о происходящих там процессах. Эти волны генерируются в области полярного овала и распространяются под углом ≈ 45 градусов с северо-запада на юго-восток в утреннем секторе и с северо-востока на юго-запад в вечернем секторе. При этом в случае достаточно высокой концентрации электронов, вариации фазы Фарадеевских замираний являются более чувствительным индикатором возмущений и дают лучшее пространственно-временное разрешение. В период высокой солнечной активности возмущения такого типа наблюдаются достаточно регулярно.

Аналогичный тип волновых ионосферно-атмосферных возмущений также называют **внутренними гравитационными волнами (ВГВ)**. Ряд исследователей считают, что ВГВ могут вызываться волновыми явлениями в литосфере Земли, в частности, так называемыми сейсмогравитационными волнами (см. сейсмогравитационные волны).

Несмотря на некоторое сходное звучание АГВ и ВГВ с гравитационными волнами, этот тип волн по своей природе не имеет никакого отношения к гравитационным волнам, предсказанным А. Эйнштейном.

ГЕОДИНАМИКА - наука о процессах развития твердой Земли. Процессы эти носят характер, с одной стороны, физико-химических преобразований, а с другой - механических, в широком смысле, движений и деформаций.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ - процессы в твердой Земле физико-химического и механического характера, отражающие пространственно-временную динамику различных энергетических проявлений в Земле, например, деформации земной коры, конвективные потоки в мантии, движения литосферных плит, землетрясения и извержения вулканов и т.д.

ГИПОЦЕНТР ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ (фокус землетрясения) - центр очага землетрясения (см. очаг землетрясения).

ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ - обозначается буквой G , коэффициент пропорциональности в законе тяготения Ньютона. Как известно, между двумя массами по 1 кг каждая, удаленными на расстоянии 1 м друг от друга, существует сила притяжения, вызывающая у каждой массы ускорение, равное $6,667 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ и направленное от одной массы к другой. Это значение и является гравитационной постоянной G .

ГРАВИТАЦИОННАЯ ЭНЕРГИЯ - гравитационная энергия тел, обусловленная их гравитационным взаимодействием. Термин «гравитационная энергия» широко применяется в астрофизике. Гравитационная энергия какого-либо массивного тела (звезды, облака межзвездного газа), состоящего из частиц, взаимодействующих с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния, в 2 раза больше по абсолютному значению кинетической энергии поступательного теплового движения частиц тела (это следует из так называемой теоремы вириала).

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ - универсальное, присущее всем видам материи, взаимодействие, самое слабое из фундаментальных взаимодействий элементарных частиц; имеет характер притяжения.

ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ (ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ) - физическое поле, создаваемое любыми физическими объектами; через гравитационное поле осуществляется гравитационное взаимодействие тел.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ - переменное гравитационное поле, свободно распространяющееся в пространстве со скоростью света и проявляющееся в возникновении относительных ускорений тел. Гравитационные волны крайне слабо взаимодействуют с веществом, и считается, что в настоящее время они не обнаружены с высокой степенью достоверности. Гравитационные волны были предсказаны А.Эйнштейном в 1916 году в работе по общей теории относительности. В январе 2003 года Эд Фомалоном из Национальной радиоастрономической обсерватории США в г. Шарлоттсвилль (штат Вирджиния) и Сергеем Копейкиным из университета Миссури было впервые экспериментально установлено, что скорость гравитационного взаимодействия равна скорости света, что также было предсказано Альбертом Эйнштейном. Поскольку непосредственно измерить скорость распространения гравитационных волн в настоящее время технически не представляется возможным, С. Копейкин с помощью математического аппарата теории относительности получил выражение, описывающее гравитационное поле движущегося тела через его массу, скорость движения и скорость распространения гравитационных волн. В результате оказалось возможным определить скорость передачи гравитации, измеряя гравитационное поле массивного небесного тела (планеты Юпитер), скорость орбитального движения которого и масса известны (New Scientist, 2003).

ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС - катастрофически быстрое сжатие массивных тел под действием гравитационных сил. Гравитационным коллапсом может заканчиваться эволюция звезд с массой свыше двух солнечных масс. После исчерпания в таких звездах ядерного горючего они теряют свою механическую устойчивость и начинают с увеличивающейся скоростью сжиматься к центру. Если растущее внутреннее давление останавливает гравитационный коллапс, то центральная часть звезды становится сверхплотной нейтронной звездой, что может сопровождаться сбросом оболочки и наблюдаться как вспышка сверхновой звезды. Однако, если радиус звезды уменьшился до значения гравитационного радиуса, то никакие силы не могут воспрепятствовать ее дальнейшему сжатию и превращению в черную дыру.

ГРАВИТАЦИОННЫЙ РАДИУС - в теории тяготения гравитационный радиус сферы (r_g), на которой сила тяготения, создаваемая массой m , лежащей внутри этой сферы, стремится к бесконечности; $r_g = 2mG/c^2$, где G - гравитационная постоянная, c - скорость света в вакууме. Гравитационные радиусы обычных небесных тел ничтожно малы. Например, для Солнца гравитационный радиус равен 3 км, для Земли - 0,9 см. Если тело сожмется до размеров, меньших его гравитационного радиуса, то никакое излучение или частицы не смогут преодолеть поле тяготения и выйти из под сферы радиуса r_g к удаленному наблюдателю. Такие объекты называют черными дырами.

ГРАВИТОН - квант гравитационного поля, имеющий нулевую массу покоя, нулевой электрический заряд и спин. Экспериментально пока не обнаружен.

ДЕТЕКТОР ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН - прибор, предназначенный для регистрации гравитационных волн. Впервые детектор гравитационных волн был построен и введен в действие Дж.Вебером из Мэрилендского университета. Существует несколько

типов детекторов гравитационных волн, использующих различные физические принципы, в числе которых: резонансные детекторы, наземные лазерные интерферометры, космические лазерные интерферометры, сферические детекторы и торсионные детекторы (детектор Халилова). Описание принципов действия данных детекторов приведено в настоящей монографии.

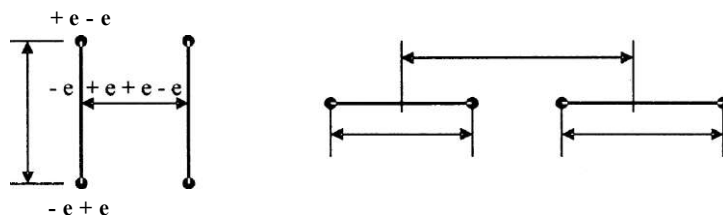
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ КАРТИНА - регулярное чередование областей повышенной и пониженной интенсивности света, получающееся в результате наложения *когерентных* световых пучков, т.е. в условиях постоянной (или регулярно меняющейся) разности фаз между ними. Для сферической волны максимальная интенсивность, наблюдается при разности фаз, равной четному числу полуволн, а минимальная - при разности фаз, равной нечетному числу полуволн.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН - сложение в пространстве двух или нескольких волн, при котором в разных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. Интерференция характерна для волн любой природы. При интерференции волн результирующее колебание в каждой точке представляет собой геометрическую сумму колебаний, соответствующих каждой из складывающихся волн. Этот так называемый *суперпозиции принцип* соблюдается обычно с большой точностью. Интерференция волн возможна только в случае, если они *когерентны*.

ИНТЕРФЕРОМЕТР - измерительный прибор, основанный на *интерференции волн*. Существуют интерферометры для звуковых волн и для электромагнитных волн (оптических и радиоволн). Оптические интерферометры применяются для измерения оптических длин волн спектральных линий, показателей преломления прозрачных сред, абсолютных и относительных длин объектов, угловых размеров звезд, для контроля качества оптических деталей и т.д.

Принцип действия всех интерферометров одинаков, и они различаются лишь методами получения когерентных волн и тем, какая величина непосредственно измеряется. Пучок света с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее число когерентных пучков, которые проходят различные оптические пути, а затем сводятся вместе, и наблюдается результат их интерференции. Вид интерференционной картины зависит от способа разделения пучка света на когерентные пучки, от числа интерферирующих пучков, оптической разности хода, относительной интенсивности, размеров источника, спектрального состава света.

КВАДРУПОЛЬ - электрически нейтральная система заряженных частиц, которую можно рассматривать как совокупность двух диполей с равными по величине, но противоположными по знаку дипольными моментами, расположенных на некотором расстоянии l друг от друга. Основная характеристика квадруполя - его квадруольный момент Q (для квадруолей, изображенных на рисунке, $Q=2e/a$, где e - абсолютная величина электрического заряда, l - размер диполей).



Примеры относительного расположения диполей в квадруполе

На больших расстояниях R от квадрупольной напряженности электрического поля E убывает обратно пропорционально R^4 , а зависимость E от зарядов и их расположения описывается, в общем случае, набором из пяти независимых величин, которые вместе составляют квадрупольный момент системы.

КВАДРУПОЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ - взаимодействие систем заряженных частиц, обусловленное наличием у этих систем квадрупольного момента.

Квадрупольное взаимодействие существенно для взаимодействия атомов на больших расстояниях, если квадрупольный момент обоих атомов отличен от нуля. Энергия квадрупольного взаимодействия атомов (не обладающих электрическим дипольным моментом) убывает с увеличением расстояния R пропорционально $1/R^5$, в то время как энергия взаимодействия дипольных моментов, наводимых в этих атомах вследствие их взаимной поляризуемости, меняется с расстоянием пропорционально $1/R^6$.

КОГЕРЕНТНОСТЬ - согласованное протекание во времени и в пространстве нескольких колебательных или волновых процессов, проявляющееся при их сложении. Колебания называются *когерентными*, если разность их фаз остается постоянной (или закономерно изменяется) во времени и при сложении колебаний определяет амплитуду суммарного колебания.

МАГНИТУДА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ - более универсальная и физически обоснованная характеристика землетрясения, чем интенсивность. Она характеризуется максимальной амплитудой записи, полученной сейсмографом стандартного типа на фиксированном расстоянии от эпицентра землетрясения. Первая шкала магнитуд была изобретена в 1935 году американским профессором Чарльзом Фрэнсисом Рихтером (1900-1985) и носит его имя. В настоящее время используется несколько магнитудных шкал. В шкале локальных магнитуд (первоначальная шкала Рихтера) за магнитуду толчка принимается величина $M_L = \lg A_{\max}$, где $A_{\max}$ - максимальная амплитуда колебаний (в мкм) по записи стандартного короткопериодного (0,8 с) крутильного сейсмографа на эпицентральной дистанции 100

При осуществлении оценки удаленных землетрясений (более 2000 км от эпицентра), где короткопериодные сейсмографы не эффективны, используется телесеismicкая магнитудная шкала для поверхностных волн с периодом 18-22 с:

$$M_s = \lg(A/T) + 1,66 \lg D + 3,30,$$

где $A_{\max}$ - максимальная амплитуда колебаний почвы (в мкм), T - соответствующий период колебаний (в секундах), D - расстояние до эпицентра (в градусах).

Между тем, глубокие землетрясения не вызывают поверхностных волн, в связи с чем американский сейсмолог Бено Гутенберг (1889-1960) предложил для землетрясений с расстоянием от их эпицентров до регистрирующих станций 600-2000 км унифицированную магнитуду, определяемую по амплитуде объемных (обычно продольных) волн с периодом 4-5 с:

$$m_b = \lg(A/T) + Q(D, h),$$

с учетом поправки Q , зависящей, кроме эпицентрального расстояния, и от глубины гипоцентра землетрясения h .

МЕТРИКА ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ - в теории относительности задает расстояния (интервалы) между точками пространства-времени (событиями) и, таким обра-

зом, полностью определяет геометрические свойства четырехмерного пространства-времени.

ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ - область внутри Земли, где под влиянием внутренних причин внезапно выделяется потенциальная энергия, вызывающая излучение сейсмических волн и как следствие землетрясение.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ОТО) - современная физическая теория пространства, времени и тяготения. Окончательно сформулирована Эйнштейном в 1915 г. В основе ОТО лежит теоретически и экспериментально доказанный факт равенства инертной массы (входящей во второй закон Ньютона) и гравитационной массы (входящей в закон тяготения) для любого тела, приводящий к принципу эквивалентности.

Равенство инертной и гравитационной масс проявляется в том, что движение тела в поле тяготения не зависит от его массы. Это позволяет ОТО трактовать тяготение как искривление пространственно-временного континуума. Таким образом, ОТО является теорией тяготения, построенной на основе теории относительности.

Основы частной теории относительности были заложены А. Эйнштейном в 1905 г. и содержат следующие основополагающие принципы:

1. *Принцип относительности.* Все инерциальные системы отсчета эквивалентны друг другу в отношении постановки в них любых физических экспериментов. Т.е. равномерное и прямолинейное движение такой лабораторной системы никак не отражается на результатах проводимых в ней опытов, если она не ускоряется и не вращается. Все равномерно движущиеся друг относительно друга наблюдатели из результатов своих экспериментов должны вывести одни и те же физические законы.

2. *Постоянство скорости света* - ничто не может двигаться быстрее скорости света - 300 000 км/сек. Результаты измерения места и времени одного и того же события, полученные наблюдателями, находящимися в равномерном относительном движении, связаны между собой соотношениями, которые называются преобразованиями Лоренца.

3. *Сокращение длины.* Как отмечали ранее Лоренц и Фицджеральд, движение любого объекта влияет на измеренную величину его длины. Если тело с наблюдателем движется мимо неподвижного наблюдателя с определенной скоростью, то неподвижному наблюдателю длина движущегося тела покажется короче истинной на величину, зависящую от скорости движения тела.

В то же время наблюдателю, находящемуся на движущемся теле, покажется уменьшение длины тела неподвижного наблюдателя.

4. *Замедление времени.* В быстро движущемся объекте время течет медленнее, чем в неподвижном.

5. *Увеличение массы.* Масса движущегося тела, с точки зрения неподвижного наблюдателя, оказывается больше массы покоя того же тела. Чем ближе скорость тела к скорости света, тем больше его масса, и при достижении скорости света масса становится бесконечно большой. Поэтому, чтобы разогнать до скорости света чрезвычайно малую массу, потребуется бесконечно большая энергия.

6. *Эквивалентность массы и энергии.* Масса может превращаться в энергию, а энергия в массу.

Если какая-то масса превращается в энергию, то количество высвобожденной энергии равно: $E=mc^2$.

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ - категории, обозначающие основные формы существования материи. Пространство выражает порядок сосуществования отдельных объектов, время - порядок смены (последовательности) явлений.

Специальная теория относительности выявила зависимость пространственных и временных характеристик объектов от скорости их движения относительно определенной системы отсчета и объединила пространство и время в единый четырехмерный *пространственно-временной континуум - пространство-время*.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ - упругие колебания, распространяющиеся в слоях Земли и несущие упругую энергию землетрясения. При землетрясениях излучаются два основных типа сейсмических волн. Продольные Р-волны по физической сути напоминают акустические волны. При их прохождении каждая частица породы перемещается вперед и назад вдоль направления движения волны. Таким образом, среда попеременно испытывает ряд сжатий и растяжений. Вторым типом сейсмической волны, излучаемой очагом землетрясения, является поперечная S-волна. При прохождении поперечной волны частицы породы перемещаются перпендикулярно к направлению, в котором она распространяется. Скорость продольной волны выше поперечной, поэтому она всегда подходит к поверхности земли раньше поперечной. Однако поперечная волна является значительно более разрушительной для зданий и сооружений, чем продольная.

СЕЙСМИЧНОСТЬ - характеризует степень подверженности территории землетрясениям. Сейсмичность региона характеризуется распределением землетрясений по площади, повторяемостью землетрясений разной силы во времени, характером разрушений и деформаций и площадью разрушений, связью очагов землетрясений с геологическим строением.

СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ - это такие движения Земли, при которых на ее поверхности возникают сравнимые по величине инерциальные и гравитационные ускорения.

Так называемые сейсмогравитационные колебания Земли регистрируются специальными длиннопериодными сейсмографами и имеют период 0,5—4 часа (10-11). В указанный диапазон попадают также собственные колебания Земли, имеющие период около 54 мин. Ряд авторов считают, что и более длиннопериодные колебания, также отражают собственные колебания Земли.

Сейсмогравитационные колебания обычно наблюдаются в отсутствие сильных землетрясений, и интерес к ним в исследованиях литосферно-ионосферных связей прежде всего связан с установленной экспериментально глобальной интенсификацией колебаний перед сильными землетрясениями. В то же время, согласно измерениям, сейсмогравитационные колебания выступают как источник сопутствующих им колебаниям атмосферы.

Сейсмогравитационные волны по своей природе также не имеют никакого отношения к гравитационным волнам.

СЕЙСМОГРАММА - автоматическая запись на различных носителях информации (светочувствительной бумаге, магнитной ленте, жестких дисках, лазерных CD, DVD-дисках и т.д.) колебаний сейсмоприемников.

СЕЙСМОПРИЕМНИК - электромеханический прибор для преобразования воспринимаемых им механических колебаний почвы в электрические сигналы.

СИЛА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ - отражает интенсивность толчка, являющуюся мерой оценки разрушений, вызванных землетрясением. Максимальное число градаций сотрясе-

ния в современных шкалах интенсивностей - двенадцать (их называют баллами). Наиболее распространены модифицированная шкала Меркалли (ММ) и Международная шкала MSK (Медведев - Спонец - Карник). Шкалы, отражающие силу (интенсивность) землетрясения, достаточно условны и их точность в определенной степени зависит от ряда субъективных факторов: качества строительства, плотности застройки территории, плотности населения и т.д.

СКАЛЯРНОЕ ПОЛЕ - поле физическое, которое описывается функцией в каждой точке пространства, не изменяющейся при повороте системы координат. В квантовой теории поля квантами скалярного поля являются частицы со спином 0. По поведению относительно пространственной инверсии скалярные поля делят на собственно скалярные, если полевая функция не меняет знака при инверсии, и псевдоскалярные, если меняет. Отвечающие им частицы имеют, соответственно, положительную и отрицательную внутреннюю четность и называются скалярными и псевдоскалярными.

СПИН - от английского слова spin, что означает - вращаться. Спин - собственный момент количества движения элементарных частиц, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы как целого. Спин называют также собственным моментом количества движения атомного ядра (и иногда атома); в этом случае спин определяется как векторная сумма (вычисленная по правилам сложения моментов в квантовой механике) спинов элементарных частиц, образующих систему, и орбитальных моментов этих частиц, обусловленных их движением внутри системы.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ - области сверхсильных гравитационных полей, образующихся, вероятно, при коллапсе вещества (см. коллапс), например при катастрофически быстром сжатии массивных звезд в конце их жизни. Никакое излучение, даже свет, не может уйти из черной дыры. Черные дыры оказывают гигантское гравитационное воздействие на окружающее пространство.

ЭНЕРГИЯ - общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Энергия не возникает из ничего и не исчезает, она может только переходить из одного вида в другой.

ЭНЕРГИИ СОХРАНЕНИЯ ЗАКОН (Э.С.З.), один из наиболее фундаментальных законов природы, согласно которому важнейшая физическая величина - энергия, сохраняется в изолированной системе. В изолированной системе энергия может переходить из одной формы в другую, но ее количество остается постоянным.

Э.С.З. для механических процессов установлен Г.В.Лейбницем (1686 г.), для немеханических явлений - Ю.Р. Майером (1845 г.), Дж.П. Джоулем (1843-1850 гг.) и Г.Л. Гельмгольцем (1847 г.).

В термодинамике Э.С.З. назван первым началом термодинамики.

До создания А.Эйнштейном специальной теории относительности (1905 г.) законы сохранения массы и энергии существовали как два независимых закона. В теории относительности они были слиты воедино.

ЭНЕРГИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ - для расчетов высвобожденной при землетрясении упругой энергии с 1956 года пользовались эмпирической зависимостью Гуттенберга-Рихтера:

$$\lg E = 11,8 + 1,5 M_s,$$

где энергия E выражена в эргах, несмотря на то, что телесейсмическая **магнитуда** M_S рассчитывается по амплитудам волн в узком частотном диапазоне и игнорирует высоко-частотные составляющие толчка. Современные же цифровые сейсмографы чувствительны к колебаниям, обладающим периодами 0,1-100 с, что делает возможным определение потока упругой энергии в широком частотном диапазоне.

Зависимость между энергией упругих волн в джоулях и магнитудой землетрясения не вполне однозначна, но в настоящее время большинство сейсмологов использует уравнение, предложенное Маркусом Батом:

$$\text{Log } E = 5,24 + 1,44 M, (\text{Дж}) .$$

Значения магнитуд по шкалам M_L и m_s вначале должны быть преобразованы с помощью следующих уравнений:

$$m = 1,7 + 0,8 M_L + 0,01 M_L^2 ;$$

$$ш = 0,56 M_S + 2,9 .$$

При увеличении магнитуды землетрясения на единицу его энергия возрастает примерно в 32 раза (в то время как амплитуда колебаний земной поверхности - в 10 раз). При самых сильных землетрясениях с магнитудой около 9, излучается энергия, равная $1,6 \cdot 10^{18}$ Дж, что можно сравнить с взрывом 300-мегатонной атомной бомбы.

Энергия, выделяемая землетрясением с магнитудой 8,9, могла бы обеспечить электроэнергией город с населением 100 тыс. человек в течение 600 лет.

ЭПИЦЕНТР ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ - проекция гипоцентра землетрясения на поверхность Земли.

ЭПИЦЕНТРАЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ - проекция очага землетрясения на поверхность Земли.

ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ - расстояние, между эпицентром землетрясения и рассматриваемой точкой, измеренное вдоль поверхности Земли. Выражается в линейных (км) или угловых (градус) величинах.

НЕКОТОРЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Наименование	Значение
Площадь поверхности Земли	$5 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$
Радиус Земли:	
Экваториальный	6 378 164 м
Полярный	6 356 799 м
Средний	6 371 030 м
Масса Земли	$5,976 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Радиус Солнца	$6,9599 \cdot 10^8 \text{ м}$
Масса Солнца	$1,989 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Светимость Солнца	$3,826 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$
Масса Луны	$7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}$
Средний радиус Луны	1 737 530 м
Среднее расстояние между Землей и Луной	$3,84400 \cdot 10^5 \text{ м}$
Минимальное расстояние от Земли до Марса (27 августа 2003 г)	$5,6 \cdot 10^7 \text{ м}$
Масса Марса	$6,4 \cdot 10^{23} \text{ кг}$
Астрономическая единица (среднее расстояние от Земли до Солнца)	$1,49597870 \cdot 10^{11} \text{ м}$
Парсек	$3,085678 \cdot 10^{16} \text{ м}$

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Гравитационная постоянная	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 1,25663706144 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Заряд электрона	$e = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Атомная единица массы	$1,660565 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Фарадея	$F = 96484,56 \text{ Кл/моль}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31441 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Нормальный (молярный) объем идеального газа при нормальных условиях	$V = 2,241 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Нормальное атмосферное давление	$p_{\text{атм.}} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$
Радиус первой боровской орбиты	$A_0 = 5,2917706 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Ускорение свободного падения	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$

ПЛОТНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Твердое тело	Плотность, кг/м ³	Твердое тело	Плотность, кг/м ³
Алюминий	$2,7 \cdot 10^3$	Медь	$8,9 \cdot 10^3$
Барий	$3,5 \cdot 10^3$	Никель	$8,9 \cdot 10^3$
Ванадий	$6,0 \cdot 10^3$	Свинец	$11,3 \cdot 10^3$
Висмут	$9,8 \cdot 10^3$	Серебро	$10,5 \cdot 10^3$
Железо	$7,8 \cdot 10^3$	Цезий	$1,9 \cdot 10^3$
Литий	$0,53 \cdot 10^3$	Цинк	$7,1 \cdot 10^3$

ПЛОТНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Жидкость	Плотность, кг/м ³
Вода (при 4°С)	1,00·10 ³	Ртуть	13,6·Ю ³
Глицерин	1,26·10 ³	Спирт	0,80·10 ³
		Сероуглерод	1,26·10 ³

ПЛОТНОСТЬ ГАЗОВ (ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ)

Газ	Плотность, кг/м ³	Газ	Плотность, кг/м ³
Водород	0,09	Гелий	0,18
Воздух	1,29	Кислород	1,43

УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Металл	Удельное сопротивление, Ом'м	Металл	Удельное сопротивление, Ом'м
Железо	9,8·Ю ⁻⁸	Медь	1,7·Ю ⁻⁸
Нихром	1,1·10 ⁶	Серебро	1,6·10 ⁻⁸

ЭНЕРГИЯ ИОНИЗАЦИИ

Вещество	Дж	эВ
Водород	2,18·Ю ⁻¹⁸	13,6
Гелий	3,94·10 ⁻¹⁸	24,6
Ртуть	1,66·10 ⁻¹⁸	10,4
Литий	8,62·Ю ⁻¹⁷	5,39

ПОДВИЖНОСТЬ ИОНОВ В ГАЗАХ, М²/(В С)

Газ	Положительные ионы	Отрицательные ионы
Азот	1,27·10 ⁻⁴	1,81·Ю ⁻⁴
Водород	5,4·10 ⁻⁴	7,4·Ю ⁻⁴
Воздух	1,4·10 ⁻⁴	1,9·10 ⁻⁴

ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Вещество	Показатель
Вода	1,33
Глицерин	1,47
Стекло	1,5
Алмаз	2,42

РАБОТА ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ

Металл	Дж	эВ
Калий	$3,5 \cdot 10^{-19}$	2,2
Литий	$3,7 \cdot 10^{-19}$	2,3
Платина	$10 \cdot 10^{-19}$	6,3
Рубидий	$3,4 \cdot 10^{-19}$	2,1
Серебро	$7,5 \cdot 10^{-19}$	4,7
Цезий	$3,2 \cdot 10^{-19}$	2,0
Цинк	$6,4 \cdot 10^{-19}$	4,0

МАССА И ЭНЕРГИЯ ПОКОЯ НЕКОТОРЫХ ЧАСТИЦ

Частица	m		E.	
	кг	а.е.м.	Дж	МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
α-частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733
Нейтральный л-мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498	$2,16 \cdot 10^{-10}$	135

ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ

Наименование величины	Единица		
	Название	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
<i>а) Допущенные к применению наравне с единицами СИ</i>			
Масса	Тонна	т	$1 \text{ т} = 10^3 \text{ кг}$
Время	минута	мин	$1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$
	час	ч	$1 \text{ ч} = 3600 \text{ с}$
	сутки	сут	$1 \text{ сут} = 86400 \text{ с}$
Плоский угол	градус	°	$1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$
	минута	'	$1' = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$
	секунда	"	$1'' = 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$
Площадь	гектар	га	$1 \text{ га} = 10^4 \text{ м}^2$
Объем	литр	л	$1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$
Относительная величина	процент	%	$1 \% = 10^{-2}$
	промилле	‰	$1 \text{ ‰} = 10^{-3}$
	миллионная доля	млн ⁻¹	$1 \text{ млн}^{-1} = 10^{-6}$
Температура Цельсия	градус Цельсия	°С	$1^\circ \text{С} = 1 \text{ К}$
Логарифмическая величина	бел	Б	-
	децибел	дБ	-
<i>б) Допущенные к применению временно</i>			
Длина	ангстрем	А	$A = 10^{-10} \text{ м}$
Масса	центнер	Ц	$1 \text{ ц} = 100 \text{ кг}$
Частота вращения	оборот в секунду	об/с	$1 \text{ об/с} = 1 \text{ с}^{-1}$
	оборот в минуту	об/мин	$1 \text{ об/мин} = \frac{1}{60} \text{ с}^{-1} = 0,0167 \text{ с}^{-1}$
Сила (вес)	килограмм-сила	кгс	$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$
	тонна-сила	тс	$1 \text{ тс} = 9,81 \cdot 10^3 \text{ Н}$

Давление	килограмм-сила на квадратный сантиметр (техническая атмосфера) миллиметр во- дяного столба миллиметр ртутного столба бар	кгс/см ² (ат) мм вод.ст. мм рт.ст. бар	1 кгс/см ² = 9,81·10 ⁴ Па 1 мм вод.ст. = 9,81 Па 1 мм рт.ст. = 133 Па 1 бар = 10 ⁵ Па
Напряжение (механическое)	килограмм-сила на квадратный миллиметр	кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,81·10 ⁶ Па
Мощность	лошадиная сила	л.с.	1 л.с. = 737 Вт
Теплота	калория	кал	1 кал = 4,19 Дж
Доза излучения	рад	рад	1 рад = 0,01 Дж/кг
Мощность дозы излучения	рад в секунды	рад/с	1 рад/с = 0,01 Вт/кг
Экспозиционная доза фотонного излучения	рентген	Р	1 Р = 2,58·10 ⁴ Кл/кг
Активность изотопа	кюри	Ки	1 Ки = 3,700·10 ¹⁰ с
<i>в) Допущенные к применению в специальных разделах физики и астрономии</i>			
Длина	икс-единица астрономическая единица световой год парсек	Х а.е. св.год пк	1 Х = 1,00·10 ⁻¹³ м 1 а.е. = 1,50·10 ⁸ м 1 св.год = 9,46·10 ¹⁵ м 1 пак = 3,09·10 ¹⁶ м
Масса	атомная единица массы	а.е.м.	1 а.е.м. = 1,66·10 ⁻²⁷ кг
Площадь	барн	б	1 б = 10 ⁻²⁸ м ²
Энергия	электрон-вольт	эВ	1 эВ = 1,60·10 ⁻¹⁹ Дж

Научное издание

*Хаин Виктор Ефимович,
Халилов Эльчин Нусрат оглы*

ЦИКЛИЧНОСТЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ:
ЕЕ ВОЗМОЖНАЯ ПРИРОДА

При участии ООО Агенство печати «Столица»

«Научный мир»
Тел./факс (495) 691-2847
E-mail: naumir@benran.ru. Internet: <http://bookish.iring.ru>
Подписано к печати 10.02.2009. Формат 70х100/16.
Гарнитура Тайме. Тираж 500 экз. Печать офсетная. Печ. л. 32,5.
Заказ В-711.

Отпечатано в типографии ОАО ПИК «Идел-Пресс»
в полном соответствии с качеством
предоставленного электронного оригинал-макета.
420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.
E-mail: idelpress@mail.ru
www.idel-press.ru