



## WHY WE CANNOT PREDICT STRONG EARTHQUAKES IN THE EARTH'S CRUST

I. L. Gufeld<sup>1</sup>, M. I. Matveeva<sup>1</sup>, O. N. Novoselov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 123995, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya street, 10, Russia*

<sup>2</sup> *Moscow State University of Forest (Electronics and System Techniques Faculty), 141005, Mytischy-5, 1-st Institutskaia street, 1, Russia*

**Abstract:** In the past decade, earthquake disasters caused multiple fatalities and significant economic losses and challenged the modern civilization. The well-known achievements and growing power of civilization are back-strapped when facing the Nature. The question arises, what hinders solving a problem of earthquake prediction, while long-term and continuous seismic monitoring systems are in place in many regions of the world. For instance, there was no forecast of the Japan Great Earthquake of March 11, 2011, despite the fact that monitoring conditions for its prediction were unique. Its focal zone was 100–200 km away from the monitoring network installed in the area of permanent seismic hazard, which is subject to non-stop and long-term seismic monitoring. Lesson should be learned from our common fiasco in forecasting, taking into account research results obtained during the past 50–60 years.

It is now evident that we failed to identify precursors of the earthquakes. Prior to the earthquake occurrence, the observed local anomalies of various fields reflected other processes that were mistakenly viewed as processes of preparation for large-scale faulting. For many years, geotectonic situations were analyzed on the basis of the physics of destruction of laboratory specimens, which was applied to the lithospheric conditions. Many researchers realize that such an approach is inaccurate. Nonetheless, persistent attempts are being undertaken with application of modern computation to detect anomalies of various fields, which may be interpreted as earthquake precursors. In our opinion, such illusory intentions were smashed by the Great Japan Earthquake (Figure 6). It is also obvious that sufficient attention has not been given yet to fundamental studies of seismic processes.

This review presents the authors' opinion concerning the origin of the seismic process and strong earthquakes, being part of the process. The authors realize that a wide discussion is needed to address the issues raised in this publication, including problems and possibilities of prediction of earthquakes in the crust.

Incontrovertible achievements of the Earth sciences are reviewed, considering specific features of seismic events and variations of various parameters of the lithosphere, the block structure of the lithosphere and processes in the lithosphere. Much attention is given to analyses of driving forces of the seismotectonic process. The studies of variations of parameters of the medium, including rapid (hourly or daily) changes, show that processes, that predetermine the state of stresses or the energy capacity of the medium (Figures 2 and 3) in the lithosphere, are overlooked. Analyses are based on processes of interactions between ascending flows of hydrogen and helium and the solid lithosphere. A consequence of such processes is gas porosity that controls many parameters of the medium and the oscillation regime of the three-dimensional state of stresses of the block structures (Figures 6, 7, and 12), which impacts the dynamics of block movements. The endogenous activity of the lithosphere and its instability are controlled by degassing of light gases.

The paper reviews processes of preparation for strong earthquakes in the crust with regard to the block structure of platform areas and subduction zones (Figures 13 and 14). It is demonstrated that the conventional methods yield ambiguous assessments of seismic hazard both in terms of time and locations of epicenter zones, and focal areas of subduction zones are out of control in principle. Processes that actually take place in the lithosphere are causes of such an ambiguity, i.e. the lack of any deterministic relations in development of critical seismotectonic situations. Methods for identification of the geological medium characterized by continuously variable parameters are considered.

Directions of fundamental studies of the seismic process and principles of seismic activity monitoring are considered.

**Key words:** Earthquake, instability of the lithosphere, subduction zone, hydrogen, helium, degassing, barrier effect, block structure, destruction, forecasting methods, identification of unstable systems.

Recommended by S.I. Sherman 10 October 2011

**Citation:** Gufeld I.L., Matveeva M.I., Novoselov O.N. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. V. 2. № 4. P. 378–415. doi:10.5800/GT-2011-2-4-0051.

# ПОЧЕМУ МЫ НЕ МОЖЕМ ОСУЩЕСТВИТЬ ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

И. Л. Гуфельд<sup>1</sup>, М. И. Матвеева<sup>1</sup>, О. Н. Новоселов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, Россия

<sup>2</sup>Факультет электроники и системотехники Московского государственного университета леса (МГУЛ), Мытищи, ул. 1-ая Институтская, 1, Россия

**Аннотация:** Страшные землетрясения последнего десятилетия, приведшие к многочисленным жертвам и значительному экономическому ущербу, являются вызовом современной цивилизации. Известные достижения и возрастающая мощь цивилизации оказываются бессильными перед природой. Естественно возникает вопрос, что не позволяет решить проблему прогноза, хотя во многих регионах созданы долговременно и непрерывно работающие системы мониторинга. Иллюстрацией действующей ситуации является пропуск Великого Японского землетрясения 11 марта 2011 г., хотя условия для мониторинга были уникальны. Фокальная зона находится от сети мониторинга на расстоянии 100–200 км. Это зона постоянной сейсмической опасности, и ее мониторинг осуществлялся непрерывно и долговременно. Мы должны осознать причины нашего общего провала с учетом результатов исследований за последние 50–60 лет.

Очевидным является то, что нам не удалось выделить предвестники конкретных землетрясений. Наблюдавшиеся локальные аномалии различных полей перед землетрясениями отражали другие процессы, которые ошибочно отождествляли с процессами подготовки крупномасштабных разрывов (КР). Длительное время анализ геотектонических ситуаций осуществлялся на основе переноса представлений физики разрушения лабораторных изделий на условия литосферы. Многие понимают ошибочность этих представлений, однако и в последние годы продолжают упорные попытки на современной вычислительной базе все же обнаружить аномалии различных полей, которые можно было бы трактовать как предвестники. Мы полагаем, что иллюзию этих попыток разрушило Великое Японское землетрясение. Очевидным является также то, что фундаментальным исследованиям сейсмического процесса уделялось недостаточное внимание.

В представленном обзоре изложены взгляды авторов на природу сейсмического процесса и сильных землетрясений как его часть, причем авторы отдают себе отчет в том, что необходима широкая дискуссия по всем затронутым в работе вопросам, включая проблемы и возможности прогноза коровых землетрясений.

В обзоре обсуждаются несомненные успехи наук о Земле в изучении особенностей сейсмических явлений и вариаций различных параметров литосферы, блокового строения литосферы и протекающих в ней процессов. Значительное внимание уделено анализу движущих сил сейсмотектонического процесса. Изучение вариаций параметров среды, в том числе очень быстрых (часовые или суточные), показало, что в литосфере не учитываются процессы, обуславливающие внутреннее напряженное состояние или энергонасыщенность среды (рис. 2 и 3). Это состояние рассматривается на основе процессов взаимодействия восходящих потоков водорода и гелия с твердой фазой литосферы. Следствием этих процессов является формирование газовой пористости, контролирующей многие параметры среды, и колебательный режим объемно-напряженного состояния блоковых структур (рис. 6, 7, 12), влияющий на динамику движения блоков. Дегазация легких газов контролирует внутреннюю активность литосферы и ее нестабильность.

Рассматриваются процессы подготовки сильных коровых землетрясений для блоковой структуры плитных областей и зон субдукции (рис. 13 и 14). Показана неопределенность оценки сейсмической опасности по времени и положению эпицентральной зоны с использованием традиционных методов и принципиальная неконтролируемость в настоящее время фокальной области зон субдукции. Эта неопределенность, т.е. отсутствие детерминированных связей в развитии кризисных сейсмотектонических ситуаций, обусловлена реально протекающими процессами. Рассматриваются методы идентификации геологической среды с непрерывно меняющимися параметрами.

Обсуждаются направления фундаментальных исследований сейсмического процесса и принципы мониторинга сейсмической опасности.

**Ключевые слова:** землетрясение, нестабильность литосферы, зона субдукции, водород, гелий, дегазация, барьерный эффект, блоковая структура, деструкция, методы прогноза, идентификация нестабильных систем.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования сейсмического процесса инициируются, прежде всего, интересом к проблеме прогноза сильных землетрясений, представляющих серьезную опасность для цивилизации. Пропуски разрушительных землетрясений, последние из которых были в Ки-

тае и Японии, становятся нетерпимыми для цивилизации. Работы, проводившиеся в последние 50 лет, не привели к положительным результатам. Имеется в виду прогноз эпицентральной зоны и времени сильных землетрясений в пределах нескольких суток. В то же время необходимо отметить несомненные успехи сейсмологии и смежных наук, реализующих в ряде

геотектонических ситуаций эмпирический среднесрочный и краткосрочный прогноз для отдельных регионов.

При первоначальной постановке проблема прогноза казалась достаточно понятной. Было показано, что землетрясения вызываются крупномасштабным разрывом – трещиной в недрах Земли, а не гипотетическим взрывом. Доказательством служило квадрантное распределение по поверхности Земли первых вступлений волн сжатия и растяжения. Далее рассуждения были очевидными. Образование крупномасштабного разрыва могло произойти при накоплении упругой энергии до критических значений за счет действия тектонических сил. Рассматривалась прямая аналогия с подготовкой разрушения монолитных образцов в лабораторных условиях. Полагали также, что протекающие в земной коре процессы достаточно устойчивы и весьма медленны, что облегчало их обнаружение. При этом считали, что накопление значительной упругой энергии в больших объемах земной коры не могло быть незамеченным. Необходима лишь плотная сеть станций мониторинга и длинные ряды наблюдений [Соболев, 1993; Соболев и др., 1990; Chen Young et al., 1991]. Реальность оказалась иной. За несколько десятилетий мониторинга сейсмической опасности не удалось обнаружить признаки (предвестники), достоверно указывающие на место подготовки конкретного крупномасштабного разрыва. В связи с этим был даже поставлен вопрос о принципиальной невозможности краткосрочного прогноза места и времени сильного события и необходимости усиления работ в области сейсмостойкого строительства. Высказывались также мысли о случайном по времени проявлении сильных сейсмических событий [Geller, 1991; Bak, Tang, 1989; Evaluation..., 1991; Nature..., 1997; Normile, 1996]. Однако такая постановка проблемы вряд ли была тогда оправданной. Эти выводы делались лишь на основе негативного опыта прогноза, а не на основе анализа природы сейсмического процесса и сильных сейсмических событий как его составной части.

В то же время были обнаружены сложные пространственно-временные изменения параметров земной коры, происходящие на различных пространственных масштабах и в широком диапазоне периодов, от часов–суток до многих лет. Особенности этих изменений нельзя было объяснить в рамках физики и механики подготовки разрушения монолитных образцов. Несоответствие процессов в лабораторных условиях наблюдениям в земной коре видели многие. Еще в 1980 г. в предисловии к работе [Физические процессы..., 1980] М.А. Садовский и В.И. Мячкин отметили: «...применение достижений физики и механики разрушения технических материалов и образцов горных пород к пространственно-временным масштабам разрушения горных масс является принципиально более сложным и намного менее очевидным...». Геологическая среда представляется тем объектом, знания о ко-

тором не только недостаточны, но и пополнение которых также является непростой задачей. Методы мониторинга отражают локальные ситуации, в то время как основные процессы носят более масштабный, планетарный или региональный, характер. По параметрам локальных зон мониторинга необходимо было судить о региональных геотектонических ситуациях.

Действительно, крупномасштабные разрывы в земной коре происходят с неконтролируемой регулярностью в одних и тех же межблоковых (граничных) структурах, т.е. в геологической среде существуют условия воспроизводства следующих актов «разрушения». В геологической среде блоки (в отличие от зерен в поликристаллических материалах) испытывают непрерывный режим движений относительно друг друга, сохраняя при этом целостность среды. Все это существенно отличает геологические и лабораторные условия. Естественно возникал вопрос, какие процессы происходят в среде? Следует учитывать, что геологические и геофизические науки существенно отличаются от классических наук, таких как физика, химия, материаловедение и др., где можно повторить эксперименты и контролировать условия их проведения.

Сейсмические явления, кроме крупномасштабных разрывов (сильная и средняя сейсмичность), включают слабую сейсмичность, а также непрерывный планетарный микросейсмический шум и криповые подвижки блоков относительно друг друга. Ясно, что механизмы их различны. Однако необходимо было понять взаимосвязь этих процессов и природу инициирующих их сил. Исторически можно говорить о двух путях развития представлений о сейсмическом процессе. Первый путь, относящийся к началу прошлого века [Reid, 1910], почти полностью основывался на представлениях физики и механики разрушения монолитных образцов. С учетом наблюдательных данных движущие силы процесса связывали с тектоникой плит, т.е. с движением плит. Проблемными оставались внутриплитовые землетрясения, природа слабой сейсмичности и микросейсмического шума. Параллельно накапливались данные, свидетельствующие о значительной роли в тектонике процессов, обусловленных эндогенной активностью Земли на различных масштабных уровнях [Белоусов, 1981; Маракушев, 1991; Орленок, 1985]. При этом существенную значимость придавали вертикальному переносу энергии, в связи с дегазацией Земли. Однако оставались вопросы. Если полагать, что физические процессы лабораторных представлений подготовки крупномасштабных разрывов были верны, то почему ускользал прогноз места событий и его времени? Какие процессы отражали аномалии различных полей, если они не позволяли сделать прогноз? Необходимо отвечать на эти и многие другие вопросы.

В выполненном аналитическом обзоре, в основном за последние 60 лет, показано, результаты каких исследований приводили к переосмыслению представлений о сейсмическом процессе и ставили новые про-

блемы. Это переосмысление было связано с новыми данными о строении и процессах в литосфере и верхней мантии, а также опытом исследований явлений, предшествующих крупномасштабным разрывам. Развитие представлений о сейсмическом процессе и природе подготовки крупномасштабных разрывов позволяет уже сейчас объяснить причину неудач в прогнозе места и времени сильных землетрясений. Понимание же явлений в геологической среде при ее мониторинге, с учетом особенностей ее структуры, открывает новые направления исследований сейсмического процесса, которые, возможно, позволят избежать значительных людских потерь, а впоследствии поставить вопрос и об уменьшении экономического ущерба.

## 2. ВОЗМУЩЕНИЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В ПЕРИОД АКТИВИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

### 2.1. ОСОБЕННОСТИ ВОЗМУЩЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ИХ СВЯЗЬ С ПОДГОТОВКОЙ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

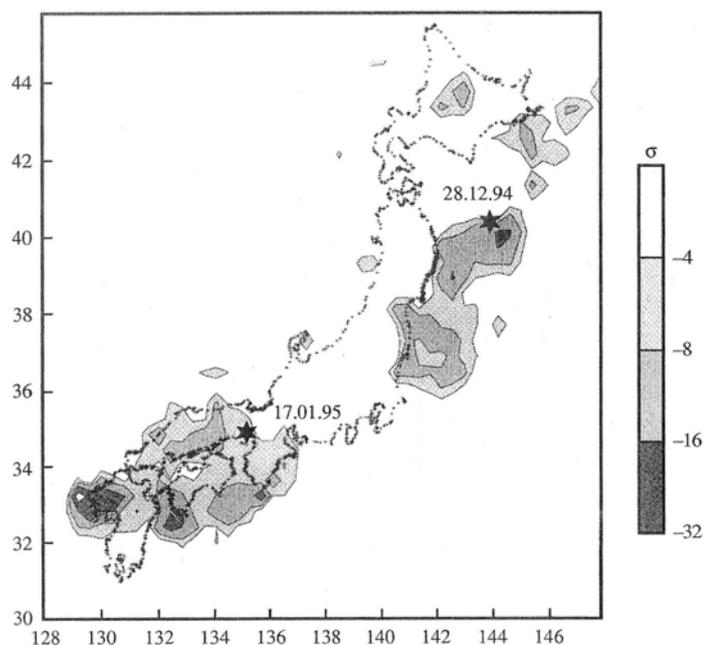
Мониторинг в сейсмоактивных регионах показал, что перед сильными землетрясениями наблюдали возмущения различных полей: режима слабой сейсмичности, наклонов и деформаций земной поверхности, времени пробега сейсмических волн, уровня подземных вод, химического состава флюида, проводимости среды, геомагнитных полей и др. [Соболев, 1993; Могги, 1988; Рикитакэ, 1979]. Для обоснования связи этих возмущений с очагом будущего землетрясения была принята парадигма, основанная на классической механике разрушения образцов [Соболев, 1993]. Подготовка сильного землетрясения должна сопровождаться ростом напряжений от весьма малых до предельных ( $\sigma_c$ ). Полагали, что при достижении  $\sigma \approx 0.5\sigma_c$  в среде, так же как и в образцах, начинаются процессы «трещинообразования», то есть сейсмические явления. С началом этих процессов связывали появление возмущений различных полей, отмеченных выше. Дальнейший рост упругих напряжений, по аналогии с деформированием лабораторных образцов, должен был приводить к последовательным стадиям активизации, сейсмическому затишью и акту землетрясения [Соболев, 1993; Могги, 1979; Канамори, 1981]. В рамках этой парадигмы возмущение любого из параметров, даже если это был только один параметр (чаще так и было), стали называть предвестником землетрясения, а фиксируемое возмущение ретроспективно относили к наиболее сильному событию, даже если менее сильное событие в этот период времени происходило на меньшем расстоянии от точки наблюдения (такова была практика анализа). Уже эти данные требовали раздумий. Получалось, что в любой момент среда находится в возбужденном состоянии на большом расстоянии от будущего очага. Ведь предположение, что слабые со-

бытия не имеют предвестников (аномалий различных полей), заведомо можно было считать ложным. Фон всегда аномальный, так как слабых событий очень много и они не снимают напряжения, а сильные события все равно происходят. Эта ситуация в рамках лабораторных представлений геологической среды не была понята.

Довольно длительное время доказательством достоверности связей между наблюдаемыми возмущениями геофизических и геохимических полей с подготовкой землетрясения служили эмпирические соотношения между временем появления возмущения  $T$ , магнитудой события  $M$  и эпицентральной расстоянием точки наблюдения  $R$ . Анализировались уравнения типа  $\lg T = aM + b$ ,  $\lg T = aM + b \lg R + c$ ,  $\lg(TR) = aM + b$ , где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – эмпирические коэффициенты. Коэффициент корреляции между этими параметрами для «долгосрочных» и «среднесрочных» предвестников был достаточно высок (0.6–0.9), а для «краткосрочных предвестников» эти связи были неустойчивыми [Рикитакэ, 1979; Зубков, 1987; Tsubokawa, 1969; Niazi, 1984–1985]. Как оценивать эти данные? Достоверность эмпирических соотношений между временем проявления выбранного возмущения, магнитудой события и эпицентральной расстоянием точки наблюдения могла определяться только правильностью отождествления данного возмущения как предвестника конкретного землетрясения. На самом деле отсутствовала априорная информация о том, что выбранное возмущение является предвестником данного землетрясения. Было известно только положение возмущения одного из параметров во времени и пространстве [Трапезников, 1993]. Однако наибольший интерес представлял анализ изменений деформационного поля, контролирующего исходя из механики разрушения твердых тел изменения других параметров среды. Была получена следующая эмпирическая связь [Сидорин, 1979]:

$$\lg(R \cdot e^{0.7}) = 0.48M - 5.47.$$

Из нее следовало, что деформация слабо уменьшается с увеличением расстояния от очага землетрясения (здесь под очагом землетрясения понимали будущий разрыв как источник излучения сейсмических волн). Следовательно, возможен большой ареал распространения аномалий, связанных с деформационными процессами вокруг очага. Действительно, многолетний опыт наблюдений возмущений различных полей показал значительный ареал локальных аномалий перед сильными землетрясениями, удаленность которых от будущего очага события с магнитудой 7–8 достигала 1000 км и более [Соболев, 1993; Добровольский и др., 1980; Добровольский, 1984] и в целом укладывалась в диапазон расстояний  $r \sim \exp M$  (км) [Добровольский, 1984]. Значительные расстояния, на которых наблюдали возмущения полей, отождествляемые с предвестниками, требовали объяснений, так как подготовка



**Рис. 1.** Пространственное расположение зон сейсмического затишья Японии, вычисленных по алгоритму RTL [Соболев, Пономарев, 2003].  $\sigma$  – среднеквадратичные отклонения параметра от фоновых значений. Звездочка – землетрясение с магнитудой 7.2 в Кобе 17 января 1995 г. Продолжительность интервала – один год до события. Сильнейшие землетрясения не происходят в зоне максимальных изменений параметров.

**Fig. 1.** Locations of seismic quiescence zones in Japan, as estimated from RTL algorithm [Соболев, Пономарев, 2003].  $\sigma$  – mean square deviation of the parameter from background values. Star – the Kobe earthquake of 17 January 1995 ( $M=7.2$ ). Time interval – one year before a seismic event. The strongest earthquakes do not occur in zones characterized by maximum changes of parameters.

землетрясения или области разрушения по существовавшим представлениям считалась локальной.

В связи с этим была проведена проверка достоверности известных эмпирических соотношений (время проявления возмущений, магнитуда события, эпицентральное расстояние точки наблюдения). Анализ проводился для реального каталога землетрясений Средней Азии ( $M>4$ ) и случайных координат возмущений и времени их проявления. Оказалось, что коэффициент корреляции также был очень высоким (0.7 и выше), то есть возмущения любого параметра среды можно было принять за предвестник землетрясения. Следовательно, сама методология анализа была ошибочной. Фактически, то, что требовалось доказать, закладывалось в исходные предпосылки парадигмы о подобии подготовки разрушения монолитных образцов и геологической среды [Трапезников, 1993].

На случайность связей фиксируемых локальных геофизических и гидрогеохимических возмущений параметров среды с процессами подготовки землетрясений указывают также другие факты: краткосрочные возмущения в среднем проявлялись на больших расстояниях от очага, чем среднесрочные; многие возмущения были не чувствительны к акту распада очага, т.е. к изменению напряженного состояния среды [Соболев, 1993]; особенности возмущений различных полей, контролируемые в одной локальной зоне литосферы и обусловленные одним действующим фактором – деформацией, противоречат друг другу [Zhang Guami, et al., 1992; Ma et al., 1995]; разрыв не происходит в зоне контролируемых максимальных возмущений (рис. 1); длительное региональное возмущение параметров среды заканчивалось, а крупномасштабный разрыв происходит в этой зоне или вблизи через год – два [Соболев, 1993; Соболев Пономарев, 2003; Трапезников, 1993; Добровольский, 1984].

Очевидно, что наблюдаемые возмущения различных полей литосферы отражают реакцию неоднородной среды на действие внешних и внутренних сил. Можно было ожидать, что особенности этих реакций контролируются параметрами сейсмического режима. Однако анализ сейсмического режима по различным параметрам (сейсмические бреши и затишье, кольцевая сейсмическая активность, миграция очагов слабых землетрясений, концентрационный критерий, RTL параметр, т.е. степень сейсмического затишья, и др.) показывает значительную неопределенность в оценке сейсмической опасности по времени и месту [Соболев Пономарев, 2003; Математическое моделирование..., 1993; Федотов, 2005]. Область проявления локальных аномалий существенно превышала зону афтершоков (т.е. более слабых событий, следующих после главного события), в которой предполагалось накопление предельных упругих напряжений. Этот вопрос не находил объяснений в рамках предлагаемых лабораторных моделей подготовки локализованной зоны для крупномасштабного разрушения. Здесь следует отметить, что область афтершоков впоследствии была названа сейсмическим очагом [Тсубои, 1961; Садовский и др., 1987]. Были получены зависимости, связывающие сейсмическую (излучательную) энергию с объемом области афтершоков. Очаг землетрясения (реального, а не прогнозируемого события) отождествлялся с некоторым объемом горной среды с почти постоянной средней плотностью упругой энергии. Это существенный вывод. Были показаны другие любопытные результаты. Так, при возрастании магнитуды событий с 4 до 8 излучательная энергия увеличивается на шесть порядков, а плотность упругой потенциальной энергии – всего на один. При этом сброс сдвиговых напряжений в очаге оказывается в интервале 0.1–8.0 МПа, что существенно меньше литостатического давления или прочности пород [Садовский и др., 1987; Гуфельд и др., 1981; Добровольский, 1991].

Естественно возникал вопрос, могут ли наблюдательные данные быть объяснены в рамках известных моделей.

## 2.2. Модели подготовки очагов сильных землетрясений

Развитие модельных представлений о физике и механике разрушения земной коры началось в XX в. В основе практически всех моделей лежали идеи локализованного процесса подготовки каждого крупномасштабного разрыва (КР) и затухающего с расстоянием характера проявления предвестников этого разрушения. В ряде моделей учитывали региональный характер процесса подготовки КР, положение которого в пространстве не носит детерминированного характера. В разработке моделей на первый план выдвигались идеи физики и механики разрушения монолитных образцов. В моделях не конкретизировались движущие силы, речь шла вообще о силах тектонической природы, не рассматривалась также природа режима слабой сейсмичности и повторяемости крупномасштабных разрывов в одних и тех же разрушенных локализованных местах. Удивительно, но первые работы правильно отражали общую схему процесса, протекающего в земной коре, причем в них не было излишней детализации.

Так, в 1910 г. Н. Reid [Reid, 1910] отмечал, что земная кора находится в непрерывном перемещении, а подготовка к КР начинается с возникновения препятствия этому перемещению. Это препятствие локализовано, и вызванная им деформация окружающей среды убывает с расстоянием. Напряжения на локализованном препятствии постепенно увеличивается до предельных значений, и в некоторый момент оно разрушается КР. Энергия локализованной зоны среды накапливается в виде энергии упругой деформации, высвободившейся при КР. Принципиально здесь реализованы идеи физики и механики подготовки разрушения.

Через столетия тектонический процесс излагается Г.А. Гамбурцевым в следующем виде [Гамбурцев, 1960; Писаренко и др., 2008]. Земная кора в процессе своего развития расчленена на относительно крупные и прочные блоки, разделенные ослабленными зонами – сейсмическими швами. Блоки испытывают медленные относительные смещения (поднятия или опускания), приводящие к накоплению сдвиговых напряжений в ослабленных зонах. В зоне, где напряжения превышают предел прочности, возникают КР. Разрушение в одном из швов приводит к перераспределению поля напряжений в их системе, генетически связанных друг с другом. Возможен процесс миграции зон КР. При этом исследователями рассматривались стадии развития процесса, включающие в себя миграцию слабых событий снизу вверх, последующее затишье во времени для дальнейшего накопления упругой энергии перед КР. Заметим, что здесь проявились определенные догадки о возможном действии на земную кору верти-

кальных сил, приложенных к нижней части коры. Логическим продолжением этих работ является энергетическая модель сейсмического режима [Ризниченко, 1968; Ризниченко и др., 1975]. В этой модели не рассматривались процессы подготовки КР, а обсуждались общие процессы. Кора насыщается потоком энергии из мантии, и при этом изменяются ее прочностные свойства во времени. Поток энергии из мантии непрерывен, под его воздействием в среде на различных масштабных уровнях чередуются процессы консолидации и разрушения, в том числе КР. Природа потока энергии из мантии не обсуждалась, однако можно сделать вывод, что автор в большей мере имел в виду активизацию или затухание теплового потока из мантии. Можно отметить, что в этих работах уже подчеркнуто внимание к геологическим процессам и отмечалась необходимость изучения слабой сейсмичности, движения блоков и других предвестников различной природы.

Однако дальнейшее развитие представлений, по крайней мере до конца 80-х годов прошлого века, пошло по пути анализа, детализации и переноса данных лабораторных моделей разрушения на геологическую среду. Более того, наблюдаемые перед КР локальные возмущения тех или иных полей также рассматривали в рамках этих моделей, причем одни и те же возмущения различных полей находили объяснения в различных моделях. Во всех моделях, в которых осуществлялся перенос представлений подготовки разрушения монолитных образцов на условия земной коры, подготовку КР связывали с долговременной эволюцией процессов трещинообразования от микроскопического до мегаскопического (километрового) масштаба и более. В ряде моделей учитывалось присутствие подземных вод, формирующих поровое давление и оказывающих влияние на объемно-напряженное состояние среды, проявление которого существенно меньше региональных площадей. Подобные модели отличались большей или меньшей детализацией процесса подготовки КР, не внося дополнительного понимания в происходящие процессы и природу действующих сил. Перечислим основные модели, так как их содержания отражены во многих публикациях: модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Мячкин, 1978; Соболев, 1993], дилатантно-диффузионная модель (ДД) [Brace, Byerlee, 1966; Scholz et al., 1973].

Ряд других моделей, например модель, учитывающая концентрационный критерий разрушения [Журков и др., 1980], или перколяционная модель разрушения [Челидзе, 1979], также не рассматривают природу движущих сил и зоны их приложения и фактически являются моделями разрушения уже готового очага. То же можно сказать о моделях, в которых подготовка КР обусловлена процессами торможения движения блоков – модель stick-slip (скольжение по разлому) [Brace, Byerlee, 1966] и модель консолидации блоков [Добровольский, 1984, 1991]. Модель stick-slip рас-

считывает лишь процессы движения вдоль разломов, не учитывая процессы в окружающей разлом среде. Идейные основы модели консолидации вытекают из представлений Рейда и Гамбургера, учитывающих блоковое строение земной коры и движения блоков. В модели рассматривается цикл одиночного КР, включающий три фазы: фазу регулярного состояния, фазу консолидации, фазу разрушения. Общим в этих моделях является постулирование торможения блоков за счет образования механических зацеплений, однако особенности процессов в граничных структурах и природа повторяемости КР в одних и тех же граничных структурах остаются неясными.

Отметим, что ряд моделей, или, точнее, представлений о подготовке КР были основаны на описании сейсмических циклов и поведения во времени различных предвестников (проявляющихся в виде бухтообразных возмущений), например радона, режима слабой и средней сейсмичности, геохимических аномалий, деформаций, проводимости коры и др. [Уломов, Мавашев, 1967; Мавлянов, Уломов, 1976; Рац, Чернышов, 1970; Осика, 1981; Певнев, 2003; Уткин, Юрков, 2007]. Все обсуждения возвращались к идеям развития процессов прогрессирующего трещинообразования или учета особенностей разрушения горных пород в условиях всестороннего сжатия. Особый интерес представляет анализ режима слабой и средней сейсмичности, на основании которого можно говорить о реальной цикличности КР в региональном масштабе. Впервые на это обратил внимание С.А. Федотов, обнаружив существование во времени сейсмических брешей в зоне Тихоокеанского сейсмического пояса, в которых длительное время не происходило сильных сейсмических событий [Федотов, 1968, 2005]. В дальнейшем речь больше шла о периодах сейсмического затишья, предшествующих КР. Появление сейсмического затишья перед разрушением (по аналогии с характеристиками акустической эмиссии в образцах) объяснялось в рамках кинетической теории прочности и модели ЛНТ, но также может быть следствием блокировки движения блоков [Соболев, 1993; Kanamori, 1981; Добровольский, 1991]. Природа цикличности КР в одних и тех же зонах граничных структур оставалась открытой.

В последнее время внимание привлекали процессы, изменяющие силы сцепления или трения в межблоковых структурах в присутствии флюида. Фактически получает развитие модель скольжения по разломам. В работе [Киссин, 2009] рассматривается реакция дегидратации, приводящая к увеличению общего объема продуктов. Этот процесс сопровождается увеличением порового пространства и объема флюидов. Повышение порового давления приводит к гидроразрывам и впрыскиванию флюида в разломную зону. Полагали, что такой процесс является спусковым для проявления КР. В другой модели [Родкин, 2006] реакция дегидратации приводит к твердотельным превращениям и изменени-

ям физических свойств пород в граничной структуре. Увеличение в локальных зонах порового давления флюида в период превращений предваряет формирование КР, проходящих через мягкие и более жесткие (не испытывающие превращения) включения. В следующей модели рассматриваются особенности напряженного состояния геологической среды, представляемой как кулоновской, в которой учитываются хрупкость среды с внутренними границами и действующим поровым давлением флюида [Ребецкий, 2006]. Обсуждаются процессы автодиспергации горных пород в зонах сдвиговых деформаций и возможности взрывных реакций дегидратации, приводящих к хрупкому разрушению упрочненной (более мелкокристаллической структуры) и энергетически насыщенной одной из локальных зон. Если этот процесс будет подхвачен в соседних зонах, то произойдет протяженный разрыв через упрочненные и мягкие включения как следствие уменьшения коэффициента трения. В последних двух моделях граничные структуры представляются системами с чередующимися жесткими и мягкими включениями. В этих моделях также заметна лабораторная составляющая представлений о возможных процессах в граничных структурах, но не обсуждаются природа действующих сдвиговых сил и цикличность КР, а также процессов формирования жестких включений, препятствующих перемещению блоков.

Представленные модели отличаются одной общей деталью. Они рассматривают развитие локализованных и разнесенных в пространстве процессов трещинообразования, «размножение» которых приводит к развитию КР. Любые бухтообразные возмущения различных полей, происходящих на различном расстоянии от будущего КР, могли быть объяснены в рамках основных моделей. Стадийность развития процессов в рамках моделей позволяла теоретически анализировать ситуацию в широком интервале периодов – от долгосрочных (годы) до краткосрочных (месяцы). Оценить реальную продолжительность стадий различных процессов не представлялось возможным. Кроме этого, одни и те же фиксируемые возмущения можно было объяснить на основе различных моделей. В этом были проблемы использования лабораторных моделей в реальном прогнозе эпицентральной зоны и времени сильных землетрясений. Именно поэтому реальный прогноз, оставаясь эмпирическим, был обречен.

Данные наблюдений указывали на то, что развитие сейсмотектонических процессов носит более сложный характер. Общим недостатком лабораторных моделей, несмотря на их внешнюю наглядность, было отсутствие представлений о реальных процессах в геологической среде, приводящих к катастрофическим явлениям, их воспроизводству и поддержанию непрерывной сейсмичности. Однако анализ данных наблюдений и реальных сейсмотектонических ситуаций сыграл выдающуюся роль в развитии представлений о свойствах и процессах в геологической среде.

### 2.3. О ВРЕМЕНИ ПОДГОТОВКИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ РАЗРЫВОВ

Время подготовки разрушения монолитного образца в лабораторных условиях рассматривается с учетом темпа нагружения или при постоянной нагрузке на основе кинетической теории прочности. Определяющий контролируемый параметр – акустическая эмиссия. На этой базе реален прогноз времени горных ударов в рудных шахтах. Аналогичное рассмотрение ситуации в геологической среде в соответствии с классической физикой разрушения приводит к следующему. Появление дополнительной трещиноватости среды при достижения напряжений  $\sigma \sim 0.5 \sigma_c$  вызовет появление возмущений в различных полях: деформации, наклоны земной поверхности, изменения уровня воды и концентрации химических соединений, магнитного поля и др. Этот период отождествлялся со среднесрочными предвестниками (от месяцев до нескольких лет), причем условием их проявления должен быть рост напряжений, как это наблюдалось в лабораторном эксперименте. Со среднесрочными предвестниками связывали полученные зависимости  $\lg T(\Delta T) - M$  ( $\Delta T$  – длительность аномальных изменений). На основе большого объема полученных данных можно было говорить об изменениях  $\Delta T$  в зависимости от магнитуды событий. Это время увеличивалось от нескольких месяцев до десятков лет при изменении  $M$  от 3 до 8. В рамках рассматриваемых лабораторных моделей период от начала изменений в среде до момента разрушения можно было считать временем подготовки, т.е. время подготовки определяет масштаб КР. В ряде представлений время подготовки сильнейшего землетрясения оценивали в сотни лет, учитывая реальные скорости тектонических движений и необходимость увеличения напряжений на 100 бар (10 МПа). В таких представлениях предопределялась эпицентральная зона будущего землетрясения и детерминированность развития процесса. Однако эти представления вступали в противоречие с данными мониторинга. Как отмечено выше, отсутствовала априорная информация о предвестниковом характере зафиксированных локальных возмущений различных полей, КР не совпадал по месту с максимальным возмущением поля или происходил после окончания возмущения, поэтому вопрос о времени подготовки КР, как и моделей их подготовки, оставался дискуссионным.

Прогноз же осуществлялся по анализу схожести развития сейсмотектонических ситуаций или обнаружению сильных аномалий, хотя в ряде алгоритмов, например [Соболев, Пономарев, 2003], использовались представления физики разрушения монолитных образцов. Для уменьшения ложных прогнозов вводились понятия порога уровня предвестника и оценивались распределения уровня полей по площади и во времени [Соболев, 1993; Соболев, Пономарев, 2003; Моисеев, 1991], однако это не улучшало прогноз. В наблюдениях по анализу связи выделенных аномалий и землетря-

сений всегда были сомнения: случайны выделенные аномалии или они имели предвестниковый характер. При этом оставались другие вопросы, которые не находили ответа: аномалии геофизических полей, обусловленные метеорологическими и геотектоническими факторами, имели одинаковую морфологию и отсутствовало понимание отличия фоновой аномалии от аномалии, связанной с подготовкой сильного землетрясения. Неадекватность представлений о процессах в земной коре становилась все более очевидной [Физические процессы..., 1980; Сидорин, 1979; Садовский и др., 1987]. Особенно это проявлялось при прогнозировании сильнейших землетрясений, их эпицентральной зоны и возможного времени. Если были эмпирические подходы к прогнозированию сильного землетрясения в региональной зоне, то краткосрочный прогноз для этой же зоны не был подкреплен какими-либо доводами. Все это служило основанием для разработок новых моделей геологической среды и сейсмического процесса [Садовский и др., 1987, 1991].

### 3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СРЕДА, ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ВАРИАЦИЙ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Геологическая среда, имеется в виду земная кора, обнаруживает свою принадлежность к единому объекту – планете Земля. Оказывается, что реально трудно выделить границы того или иного участка земной коры и соответствующие граничные условия, контролирующее напряженное состояние. Дело в том, что наблюдаются непрерывные и разномасштабные деформации земной коры в сейсмоактивных и асейсмичных регионах, отражающие проявление эндогенной активности, особенности строения и структуры среды, причем, учитывая масштабы протекающих явлений, нельзя говорить об аналогиях с процессами деформации образцов в лабораторных условиях. В то же время необходимо прежде учитывать действующие факторы, оказывающие существенное влияние на процессы, протекающие на глубинах выше 30–40 км, где формируются очаги наиболее сильных землетрясений.

Большинство минералов и материалов горных пород, доступных для исследований, расположены в верхнем слое коры. Они находятся в относительно равновесном состоянии. С увеличением глубины литостатическое давление (давление вышележащей породы) и температура повышаются. Однако их действие на структуры различно. Литостатическое давление стремится сжать кристаллические структуры, а температурный фактор приводит к ее расширению. При этом направления максимальной сжимаемости обычно близки к ориентировке максимального теплового расширения, поэтому одновременное изменение температуры и давления в одном и том же направлении приводит к их частичной компенсации. Расчеты степени взаимной компенсации температурного расширения и

барического сжатия показывают, что до границы Мохоровичича (это в среднем около 30–35 км) реальное давление компенсирует термические деформации примерно на 0.5 величины. Материалы, опущенные с поверхности на эту глубину, увеличиваются в объеме на величину, равную половине их термического расширения [Филатов, 1987; Справочник..., 1969]. Компенсация теплового расширения барическим сжатием достигается в верхней мантии на глубинах около 100 км. Это необходимо учитывать при анализе движения флюида снизу вверх.

Среда, в отличие от лабораторных монолитных образцов, постоянно находится под действием литостатического давления. При коэффициенте Пуассона 0.25–0.30 уже на глубине 5–6 км дифференциальное напряжение будет достигать 1 кбар (100 МПа), а сдвиговые напряжения будут около 0.5 кбар. Под действием собственного веса пород развиваются сдвиговые напряжения порядка их предела упругости. В присутствии флюида развивается и постоянно поддерживается трещиноватость среды на локальном уровне. Более высокий уровень напряжений, например за счет действия внешних источников, уже невозможен. Сейсмический мониторинг, бурение на сверхглубоких скважинах и анализ реологических свойств материалов подтверждают микротрещиноватость среды как в сейсмоактивных, так и в асейсмичных регионах [Николаевский, 1980, 1982; Кольская..., 1984]. Поэтому можно говорить о парадоксе (в рамках лабораторных представлений) формирования за счет действия тектонических сил крупномасштабных структур разрушения, предваряющих сильные землетрясения.

К фундаментальным свойствам земной коры относятся блоковое строение и долговременное относительное смещение блоков по отношению к друг другу. Вследствие движения блоков на граничных структурах поддерживается высокий уровень касательных напряжений [Гзовский, 1975; Добровольский, 1991; Садовский, Писаренко, 1991; Ребецкий, 2006]. Блоки, в свою очередь не представляются цельными образованиями и состоят из отдельных монолитов размерами до 1000 м. В каждый геологический период существуют консолидированные блоки, перемещающиеся как единое целое. Однако блоки не остаются неизменными. При взаимодействии блоков отдельные их составляющие могут откалываться и присоединяться к другим блокам. Идет непрерывный процесс дробления и консолидации блоков, контролируемый не внешними и отдаленно приложенными силами, а эндогенной активизацией. Здесь учитывается то, что корни блоков и, соответственно, граничных структур, в том числе разломов, уходят глубоко в верхнюю мантию. Граничные структуры, так же как и блочные структуры, из-за действия литостатического давления находятся в предельном по энергонасыщенности состоянии (по упругой энергии), на что указывает непрерывность смещения блоков относительно друг друга. Крупномасштаб-

ные разрывы происходят, как отмечалось, в граничных структурах. Эти разрывы снимают малую часть упругой энергии  $10^3$ – $10^4$  Дж/м<sup>3</sup>, которая существенно ниже фонового уровня упругой энергии  $10^5$ – $10^7$  Дж/м<sup>3</sup> и обусловлена литостатической нагрузкой [Садовский и др., 1987; Николаевский, 1982]. На предельную энергонасыщенность геологической среды указывают также современные движения, постоянное деформирование среды, характерное как для сейсмоактивных, так и для асейсмичных регионов. Отсюда следует весьма важный вывод: в литосфере, в зоне проявления крупномасштабных разрывов или блочной среде, не существует проблемы накопления предельных упругих напряжений в больших объемах, на чем настаивает механика и физика разрушения континуальных сред [Соболев, 1993]. Возникает один из основных вопросов в физике сильных землетрясений. Какие процессы приводят к образованию в предельно энергонасыщенной среде, не терпящей локальных перенапряжений, крупномасштабных структур разрушения на границах движущихся блоков и их воспроизводству?

Однако существуют и другие вопросы, требующие ответа. При мониторинге различных геофизических и геохимических полей в сейсмоактивных и асейсмичных регионах обнаружена непрерывная изменчивость параметров среды (деформаций, уровня воды, режима слабой сейсмичности, проводимости и др.), представляемая набором гармоник с периодами от часов – суток до многих лет [Динамические процессы..., 1994; Лукк и др., 1996]. Наблюдаемые быстрые разномасштабные и несинхронные изменения полей происходят в условиях квазипостоянных градиентов литостатического давления и температуры, а также весьма медленных тектонических движений. Еще один удивительный результат. На основе данных о фокальных механизмах очагов землетрясений (пространственного направления подвижек по разрывным структурам) в локальных зонах показана значительная неоднородность локальных полей тектонических напряжений, описываемая в том числе и случайным полем. Столь быстрые вариации параметров среды не могут быть связаны с медленными тектоническими движениями, но они отражают изменения объемно-напряженного состояния (ОНС) среды. Очевидно, что наблюдаемые вариации ОНС среды связаны с периодическими изменениями объема различных элементов среды.

Другие важные результаты. Вариации объемного деформирования, с которыми связывается подготовка крупномасштабных разрывов, лежат в пределах одного порядка для сейсмоактивных и асейсмичных регионов, а плотность потока энергии слабых землетрясений в этих зонах различается в три порядка [Соболев, 1993; Динамические процессы..., 1994; Невский, 1994]. Наблюдается также колебательный режим слабых землетрясений в одних и тех же местах. Все это указывает на то, что существует переменное во времени воздействие на среду дополнительной энергии, причем это

распределенное по площади воздействие реализуется по каналам снизу, т.е. из мантии, вверх – в земную кору. Опубликованы также другие данные, косвенно подтверждающие реальность таких процессов.

Например, было замечено, что после сильного глубоководного сейсмического события через несколько лет в этой же региональной зоне происходит коровое событие [Моги, 1988; Захарова, Рогожин, 1999]. В других регионах Центральной и Южной Азии реакция корового слоя на глубоководное событие была более быстрой. С начала прошлого века выделено девять пар таких событий (глубоководных с  $M > 6.7$  и коровых с  $M > 7$ ) с интервалом времени от нескольких недель до месяцев [Копничев, Соколова, 1997; Koprnichev et al., 2003, 2011]. При этом наблюдалось резкое затухание S-волн в верхней мантии и нижней коре, т.е. среда в больших объемах перешла в «возбужденное» состояние. Также с использованием этого метода были выделены перед одиночными сильными коровыми землетрясениями субвертикальные каналы поглощения S-волн шириной всего в несколько километров. Например, за полгода до Байсорунского землетрясения (Северный Тянь-Шань, 1990 г.) в средней части коры на глубинах 20–40 км сформировался слой очень сильного поглощения. Сразу же после события поглощение в средней коре существенно уменьшилось, а в нижней коре и верхней мантии (40–80 км) – резко возросло. В последующие несколько лет поглощение S-волн уменьшается в верхней мантии и одновременно увеличивается в нижней коре. Быстрые вариации поля поглощения S-волн связываются с «подъемом мантийных флюидов» в земную кору.

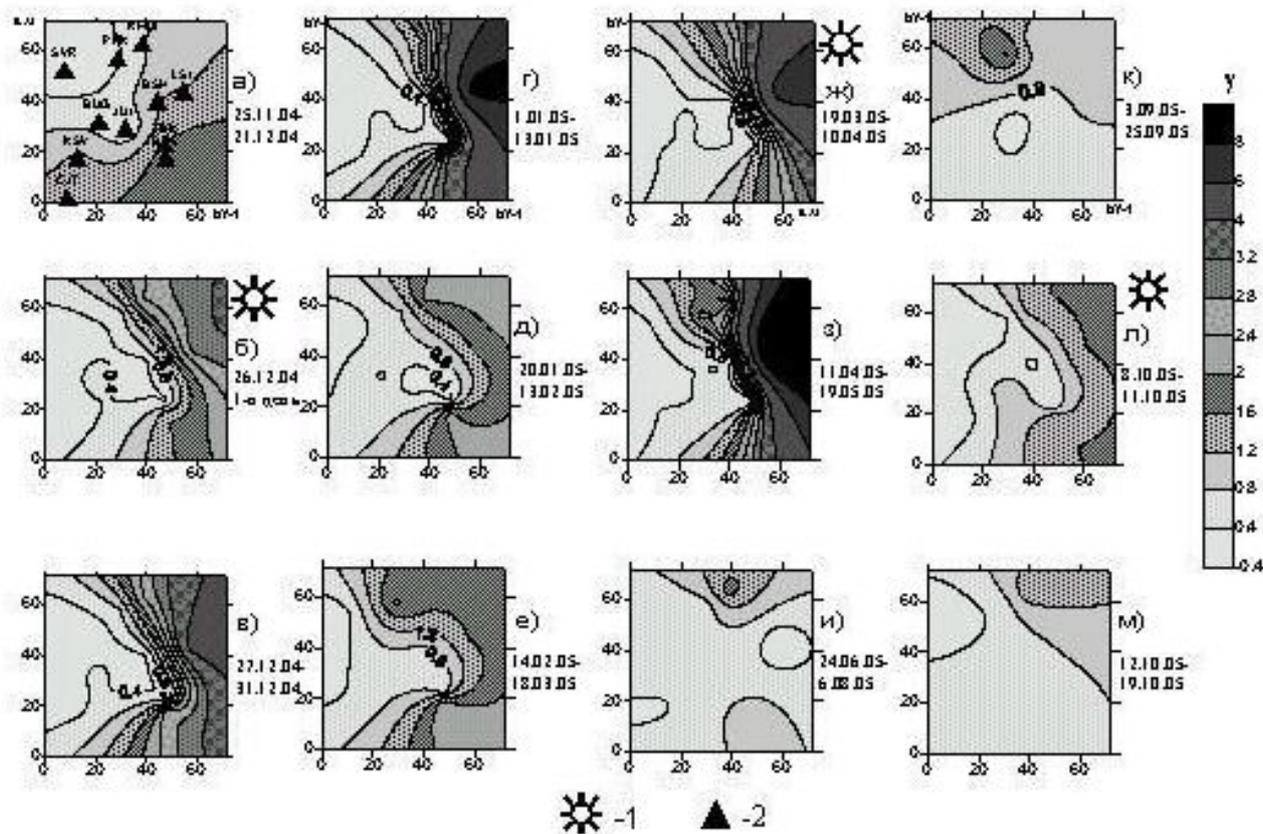
Перед сильными землетрясениями наблюдали изменения проводимости верхней мантии и литосферы. В качестве иллюстрации можно привести данные последовательных изменений проводимости среды от верхней мантии к нижней коре перед Спитакским землетрясением. Анализ проводился на периодах магнитных возмущений 5–20 мин (глубина контроля 2–10 км), 30–60 мин (глубина контроля 10–20 км) и Sq вариациях магнитного поля с периодами 5–20 час (глубина контроля 100–300 км). Заметные изменения проводимости верхней мантии начались примерно за 2.5 года до события, а параметров нижней коры – с задержкой на один год. Здесь также рассматривали влияние на среду высокой скорости продвижения фронта «флюидизации» [Grigorian, 2007]. С действием эндогенной активности Земли необходимо рассматривать зависимость числа землетрясений от географической широты зоны мониторинга. Устойчиво проявляется спад количества землетрясений от экватора к полюсам [Левин, Чиков, 1999].

Влияние эндогенной активности Земли проявляется в быстрых изменениях напряженного состояния коры при воздействии на нее упругих волн отдаленных сильных землетрясений. Естественно, что и многочисленные слабые сейсмические события будут оказывать

влияние на ближайшее окружающее пространство. Это означает, что среда сейсмоактивных регионов всегда находится в возбужденном состоянии, в том числе в периоды отсутствия сильных землетрясений. Приведем данные по изменчивости ОНС среды Кавминводского полигона при воздействии на него упругих волн сильнейших двух Суматранских и Пакистанского событий (26.12.2004 г.,  $M=9.0$ ; 28.03.2005 г.,  $M=7.2$ ; 08.10.2005 г.,  $M=6.0$ ). Соответствующие расстояния до полигона 6800 и 2700 км. Площадь полигона  $70 \times 70$  км<sup>2</sup>. На рис. 2 показаны площадные изменения параметра  $\gamma$ , представляющего отношение энергий горизонтальной радиальной и тангенциальной компонент обменных волн, рассчитанного по множеству слабых событий на сети сейсмических станций полигона. Этот параметр характеризует изменчивость ОНС среды. Быстрое влияние отдаленных сильных событий на ОНС среды очевидно, причем можно отметить, что изменения ОНС среды происходят не синхронно по глубине [Попова и др., 2007].

Быстрые изменения параметров среды по глубине отмечены также на Камчатском геодинамическом полигоне. На рис. 3 представлено поле изменений скоростей продольных волн в период Кроноцкого землетрясения для трех периодов [Славина и др., 2005]. Столь быстрые изменения параметров среды по глубине исключают возможность рассмотрения влияния тектонических движений или процессов метаморфизма.

Весь опыт мониторинга параметров литосферы и мантии показывает, что реализуются непрерывные изменения их характеристик в широком диапазоне периодов. Обращает на себя внимание непрерывность микросейсмического шума, контролируемого в поверхностных слоях коры. Внешние воздействия усиливают уровень микросейсмического шума, а не ослабляют его. Это указывает на значительную роль эндогенных процессов в его возбуждении [Рыкунов, Смирнов, 1985]. На действие эндогенных процессов в мантии указывает целый ряд данных. Показано чередование зон с повышенными и пониженными скоростями продольных волн в пределах глубин 80–300 км, при этом число таких зон превышает количество границ, в пределах которых возможны фазовые переходы [Павленкова, 2001]. Обнаружены вариации времен пробега продольных сейсмических волн на длинных трассах, источниками которых являлись подземные ядерные взрывы (трасса Невада, США – Боровое, СССР – Казахстан). Время пробега Р-олны было не постоянным и изменялось с периодами 6–7 и 9–11 лет [Adushkin et al., 2001; Ан, Люкэ, 1992]. С использованием в качестве источников упругих волн ядерных взрывов было показано, что, независимо от тектонической активности региона и эпицентрального расстояния, в кинематических и динамических параметрах сейсмических волн в литосфере содержатся гармонические составляющие с периодами 4–6 лет [Гамбурцева и др., 1982].



**Рис. 2.** Быстрые изменения параметров среды (отношение энергии горизонтальных радиальной и тангенциальной компонент обменных волн) на Кавминводском полигоне в период катастрофических Суматранских землетрясений 2005–2006 года. 1 – землетрясения; 2 – станции мониторинга на полигоне [Попова и др., 2007]. Такие изменения параметров среды могут быть связаны с возбуждением внутренних источников.

**Fig. 2.** Rapid changes of parameters of the medium (ratio of energies of horizontal radial and tangential components of converted waves) at the Kavminvody polygon in the period of catastrophic Sumatra earthquakes in 2005–2006. 1 – earthquakes; 2 – monitoring stations [Попова и др., 2007]. Changes of the parameters of the medium may be related to excitation of internal energy sources.

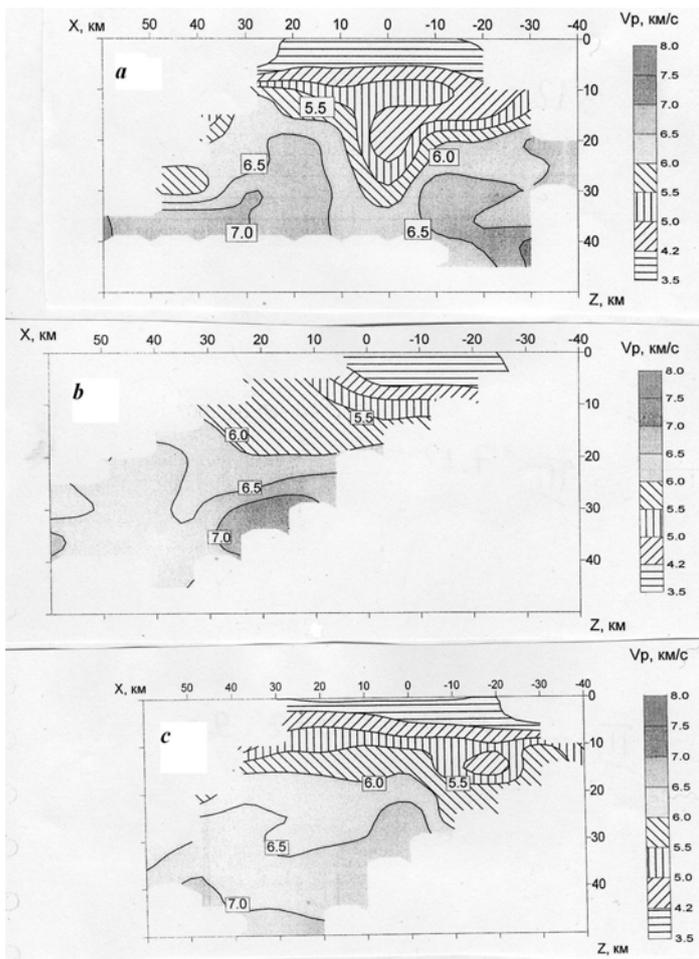
В более поздних работах на эпицентральных расстояниях 800–500 км были выделены в параметрах сейсмических волн ритмы с периодами 2 и 4 года [Адушкин и др., 1998]. Отдельно следует выделить обнаруженную цикличность глубоководной сейсмической активности с периодами 7–9 и 12–14 лет [Поликарпова и др., 1995].

При накопленном уровне наших знаний о строении и изменениях параметров среды возникают дополнительные вопросы, на которые необходимо было отвечать при анализе сеймотектонического процесса: 1. Какова природа слабых и разномасштабных вариаций объемно-напряженного состояния геологической среды вблизи предельного уровня устойчивости? При этом обсуждению подлежат деформационные процессы в земной коре и верхней мантии, протекающие в условиях квазипостоянных градиентов давления и температуры. 2. Природа процессов, приводящих к

движению блоков, связаны ли они с процессами перемещения литосферных плит или обусловлены эндогенными процессами в зоне верхней мантии и нижней коры? Это ключевые вопросы.

#### 4. ПРОЦЕССЫ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Несмотря на то, что многочисленные экспериментальные данные указывают на значительную или определяющую роль эндогенных процессов в тектоногенезе, во многих работах рассматриваются и поддерживаются идеи, связывающие внутриплитовую сейсмичность с процессами взаимодействия границ сталкивающихся литосферных плит и распространением напряжений от этих границ во внутренние области. Примером таких границ являются Тихоокеанский сейсмический пояс, зона взаимодействия Индийской плиты с



**Рис. 3.** Быстрые изменения скорости продольных волн по глубине в период Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. *a* – период 3–7 января 1997 г., *b* – 7–20 декабря 1997 г., *c* – период 21 декабря 1997 г. – 31 декабря 1998 г. [Славина и др., 2005]. Скорости продольных волн являются структурно чувствительными параметрами, и их быстрые изменения связаны с перестройкой структуры среды за счет диффузии легких газов. Исключается влияние медленных тектонических процессов.

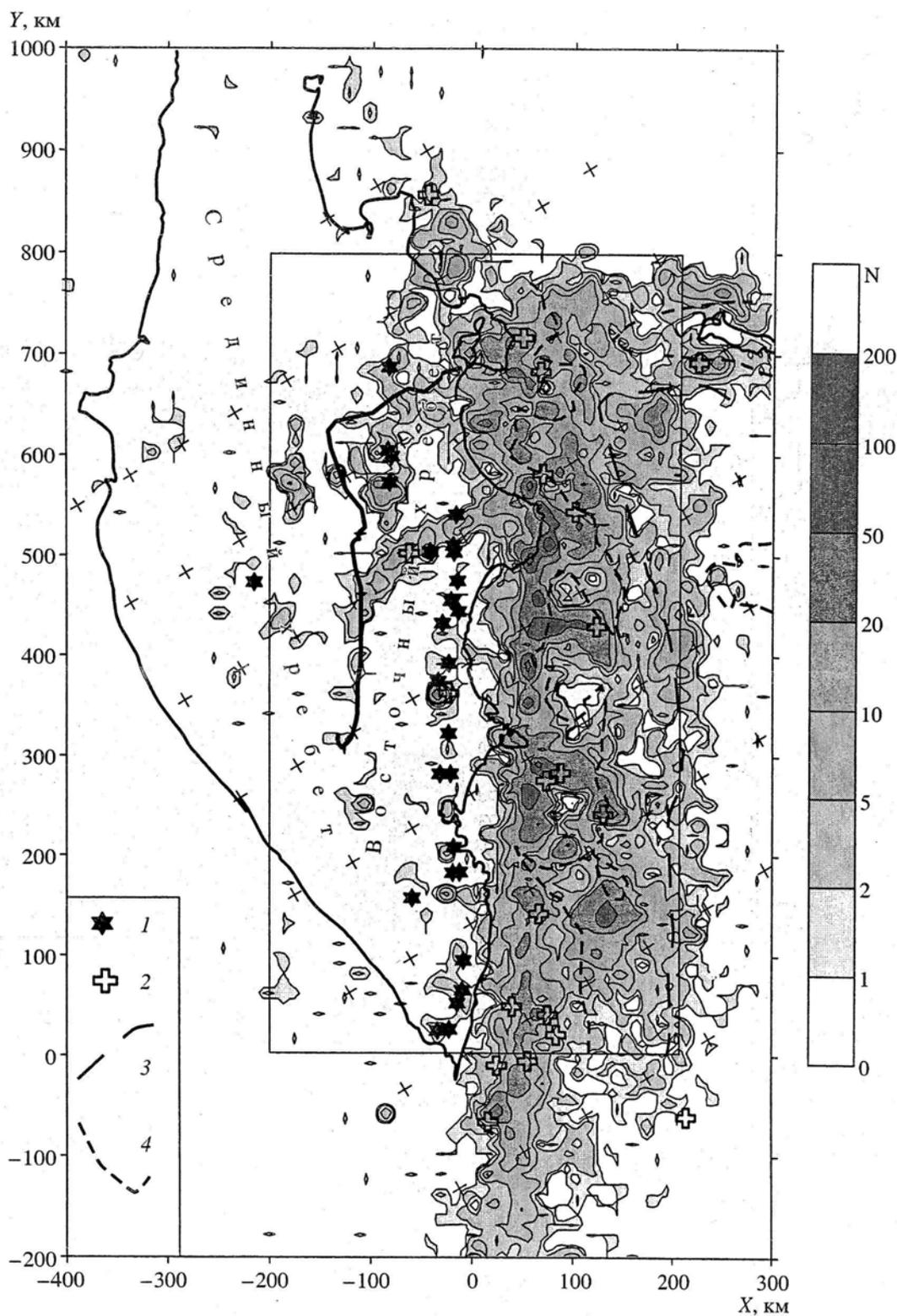
**Fig. 3.** Rapid changes of longitudinal wave velocities in depth during the Kronotsk earthquake of 05 December 1997. *a* – period from 03 to 07 January 1997; *b* – from 07 to 20 December 1997; *c* – from 21 December 1997 to 31 December 1998 [Славина и др., 2005]. Velocities of longitudinal waves are structure-sensitive parameters, and their fast changes are related to restructuring of the medium due to diffusion of light gases. Impacts of slow tectonic processes are excluded.

системами Гималаев, Памира, Тянь-Шаня и Средней Азии, зона взаимодействия Аравийской плиты с Кавказом и Средней Азией и др. При этом сильнейшие внутриплитовые землетрясения происходят на больших расстояниях от этих границ. Более того, в очагах сильных внутриплитовых землетрясений сбрасываются напряжения, на порядок превосходящие сбрасываемые напряжения в очагах межплитовых землетрясений, что нельзя объяснить в рамках механических процессов взаимодействий плит [Scholz et al., 1986; Раутман, 1991]. На платформах отмечается более вы-

сокая неоднородность поля напряжений на различных масштабных уровнях [Lau, Wallace, 1995; Rodkin, 2001]. В последнее время появились новые оценки напряженного состояния сейсмоактивных внутриплитовых областей. Так, для Алтае-Саянской области показано, что только за 10–15% напряжений ответственны боковые воздействия, которые могут быть связаны с движением литосферных плит. Большая часть напряжений обусловлены внутренними факторами, такими как неоднородность коры и мантии и остаточные напряжения [Ребецкий, 2008]. Мы не будем обсуждать проблемы плитотектоники и дискуссии, посвященные этой тематике [Спорные аспекты..., 2002; Океанизация..., 2004]. Приведем лишь некоторые результаты для одной из зон Тихоокеанского сейсмического пояса, показывающие реальность преимущественно вертикальных, а не горизонтальных источников переноса энергии. На рис. 4 приведено распределение плотности очагов землетрясений для Камчатки [Boldyrev, 2002]. Положение активных и менее активных участков весьма устойчиво во времени. Анализ этих данных показал, что сильные события происходят в зоне с повышенной активностью слабых землетрясений, которые не способствуют разрядке напряжений (!?). Очевидно, что если бы на сейсмичность оказывало влияние движение океанической коры, как это следует из модели плитотектоники, то распределение в пространстве сейсмических событий было бы иным. Кроме этого, нужно учитывать то, что для многих сильных сейсмических событий Курило-Камчатской зоны плоскости подвижки (разрыва) расположены вкrest падения зоны Заварицкого-Беньюфа, что не позволяет увязывать их с направлением смещения, которое должно быть присуще зоне субдукции [Рогожин, 1997; Балакина, 2002].

#### 4.1. РЕИДНОЕ ТЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ МАСС

Прямые геодезические измерения, а также мониторинг с использованием спутниковых систем GPS показывают непрерывную изменчивость высот поверхности, имеющих как вертикальную, так и горизонтальные составляющие, причем направления смещения имеют положительную и отрицательную компоненты. Очень широк частотный диапазон колебания высот поверхности или расстояний между реперами, начинающийся от герц. Современные движения земной поверхности проявляются со скоростями порядка 0.001–0.01 м/год. Основные смещения идут вдоль границ блоков, а сами блоки, как целое, испытывают колебательный режим весьма медленных и относительно быстрых движений. Наиболее наглядно это происходит при реализации разрывов, проявляющихся в виде сбросов, взбросов, надвигов, движений, обратных надвигов, сдвига-надвига и обратного процесса. Это геологические термины, но они отражают характер движения блоков относительно друг друга, а также тот факт,



**Рис. 4.** Плотность эпицентров ( $N$  на  $100 \text{ km}^2$ ) Камчатских землетрясений 1962–1998 гг. Прямоугольник – область уверенной регистрации событий. 1 – вулканы; 2 – сильные землетрясения; 3 – ось глубоководного желоба; 4 – изобата – 3500 м [Boldyrev, 2002]. Обращает на себя внимание устойчивость во времени участков сильной и слабой сейсмичности, что ставит на обсуждение вопрос о вертикальных процессах переноса энергии и слабом влиянии горизонтальных деформаций.

**Fig. 4.** Density of epicentres ( $N$  per  $100 \text{ km}^2$ ) of Kamchatka earthquakes in the period from 1962 to 1998. Box – area of reliable record of event. 1 – volcanoes; 2 – strong earthquakes; 3 – deep-sea trough axis; 4 – isobath (3500 m) [Boldyrev, 2002]. It is of interest that areas of strong and weak seismicity are stable in time; this suggests a need to discuss vertical energy transfer processes and weak impacts of horizontal deformations.

что разрывы по граничным структурам могут распространяться как снизу вверх, так и сверху вниз [Родкин, 2006].

Колебательный режим движения блоков как единого целого может контролироваться процессами, протекающими в зоне от нижней коры до верхней мантии, т.е. на глубинах 20–100 км. Именно эти движения блоков относительно друг друга создают, как отмечалось выше, в граничных структурах большие касательные напряжения. Реально мы наблюдаем объемное течение горных масс, которое получило название рейдного течения. Скорости движения блоков малы и по порядку величины, пересчитанной на скорости деформации, составляют величину порядка  $5 \cdot 10^{-10}$  1/сутки, однако амплитуда деформации по геологическим оценкам может достигать 8–10 %.

Во многих работах отмечается, что на различных масштабных уровнях земной коры и мантии идет непрерывный процесс реорганизации структуры и что каждый уровень влияет на смежные, создавая тем самым сложный характер физико-химических полей [Атлас..., 2002; Фундаментальные проблемы..., 2001]. Реорганизация структуры различных оболочек Земли связывается с ее эндогенной активностью, инициируемой флюидными и флюидно-магматическими потоками [Флюидные потоки..., 2002; Вертикальная аккреция..., 2002; Леонов, 1994; Leonov, 1997]. Консолидированная кора, имеющая структурно-вещественную расслоенность, подвержена непрерывным структурным преобразованиям, при которых меняется положение различных границ. Происходит «кажущийся» переход пород из одной оболочки в другую, которой соответствуют новые P–T параметры. При этом происходят изменения не только структуры за счет гранитизации и вертикальной аккреции вещества, но и общего объема (увеличение или уменьшение объема в зависимости от исходного состава вещества и фазовых переходов базальт – гранит или гранит – базальт) [Летников, 2000]. Важнейшим следствием физико-химических преобразований в низах блоков является приобретение средой способности к объемной (рейдной) деформации. Объемная деформация в низах блоков реализуется в движении каждого блока вдоль граничных структур, причем низы различных блоков, в том числе соседних, могут испытывать разнонаправленный режим движений. Одной из причин разнонаправленности непрерывных преобразований структуры может быть переменный тепловой поток, обусловленный также восходящей диффузией водорода и гелия [Маракушев, 1992; Орленок, 1985; Letnikov, Dorogokupets, 2001].

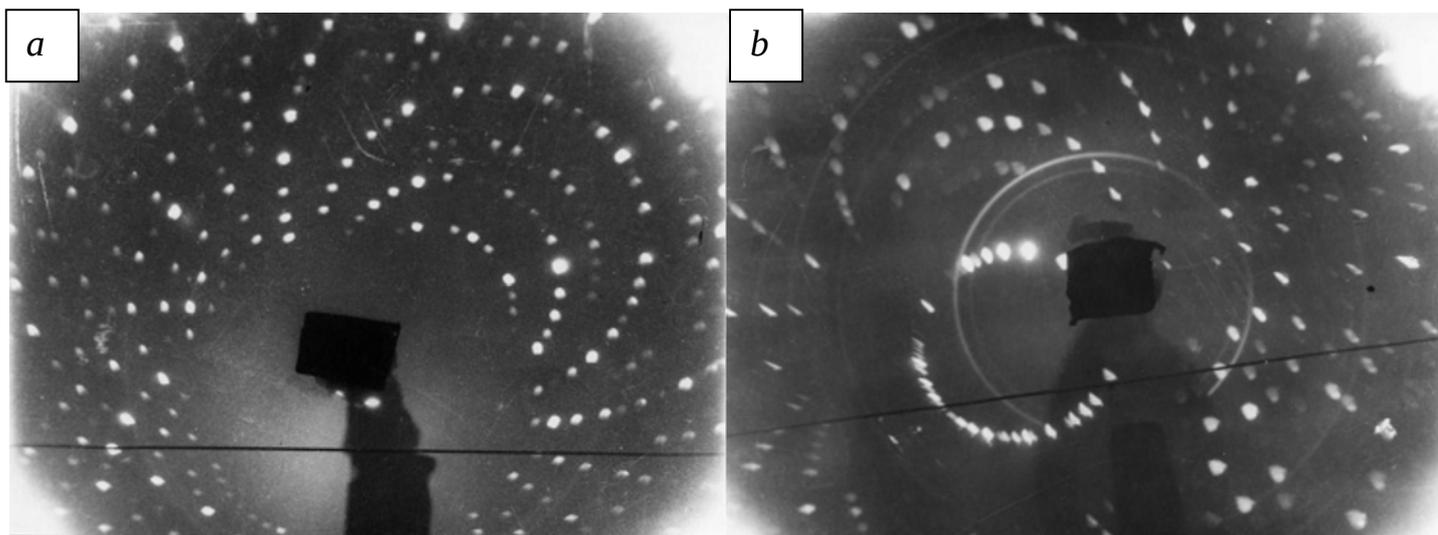
#### 4.2. ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ И ВАРИАЦИИ ОНС СРЕДЫ

Разномасштабный, несинхронный в различных местах и периодический режим вариаций различных параметров среды исключает преимущественную зави-

симость и связь с весьма медленными тектоническими деформациями ( $\epsilon \sim 10^{-10}$  1/сутки), действующими к тому же со стороны границ блоков (плит). На действие других силовых факторов указывают ряд наблюдений, ставивших исследователей в тупик [Соболев, 1993]. Например, краткосрочные предвестники наблюдались на больших расстояниях, чем среднесрочные. Показаны также особенности пространственного распределения напряжений, отличающиеся горизонтальной мозаичностью и вертикальной периодичностью [Ребецкий, 2008; Айтматов, 2003]. Здесь перепады дополнительных напряжений отличались более чем на порядок, в то время как упругие модули верхней коры изменяются в 1.5–3 раза. Эти и приведенные выше данные указывают на то, что в среде, находящейся в критическом состоянии, действуют дополнительные силы с быстро меняющимся во времени объемом приложения, изменяющие потенциальную энергию упругого смещения атомов из устойчивого положения, создаваемого литостатической нагрузкой. В связи с этим были рассмотрены процессы деформирования, связанные с изменением объема кристаллической структуры элементов геологической среды и обусловленные взаимодействием переменного восходящего потока легких газов (водорода и гелия) с твердой фазой [Гуфельд и др., 1993]. Гелий – продукт распада изотопов урана и тория ( $He_4$ ) и реликтовый гелий ( $He_3$ ). Основной резервуар водорода находится, по-видимому, во внешнем ядре, и значительные его количества распределены в мантии [Орленок, 1985; Маракушев, 1992; Letnikov, Dorogokupets, 2001]. Влияние на изменения объема кристаллических структур горных материалов могут оказывать и другие атомы внедрения – O, C, N, а также некоторые комплексы типа H–C и H–N. Однако их подвижность в кристаллической структуре значительно меньше, чем высокоподвижных легких газов.

##### 4.2.1. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ГОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ В НИХ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА

Неустойчивость материалов, обусловленная диффузией в них водорода и гелия, хорошо известна из работ по ядерному материаловедению и физическому материаловедению, например [Комаров, 1990]. При имплантации легких газов в различные материалы происходят структурные перестройки и аморфизация структуры, формируется газовая пористость, изменяются физико-механические свойства. Общим следствием имплантации легких газов является формирование внутреннего состояния, проявляющегося в эффектах ползучести и изменения объема. Аналогичные эффекты наблюдаются в горных минералах со значительным содержанием урана и тория [Морозова, Ашкенази, 1971] и на модельных материалах (оливин, пироксен, кварцит и др.). Однако в горных материалах были обнаружены особенности проявления процессов релаксации [Гуфельд и др., 1998; Gufeld et al., 1997].



**Рис. 5.** Лауэграммы кристаллов оливина: *a* – исходные (в том числе после высокотемпературной дегазации), *b* – после имплантации гелия или водорода. Текстура деформации кристалла аналогична текстуре, возникающей при механическом нагружении.

**Fig. 5.** Laue grams of olivine crystals: *a* – initial (including those after high temperature degassing); *b* – after implantation of helium or hydrogen. The texture of crystal deformation is analogous to that in case of mechanical loading.

Образцы горных материалов, на которых обычно проводят исследования, весьма длительное время находились в нормальных условиях, в них сформировались равновесная структура и пористость. Остаточный гелий и водород находились в вакансиях и порах. Лауэграммы таких образцов отражают правильную кристаллографическую симметрию. В процессе выдержки образцов в среде гелия или водорода, после их дегазации в безмасляном вакууме, при различной температуре наблюдались изменения кристаллографической структуры. Лауэграммы таких образцов отражают текстуру деформации (рис. 5). Аналогичная картина наблюдалась на начальных стадиях дегазации образцов, имеющих первоначально монокристалльную структуру. После насыщения образцов водородом или гелием новых фаз не обнаружено, отмечалась аморфизация структуры и появление сверхструктурных линий (последнее, по-видимому, связано с появлением водородной подрешетки). При этом, что весьма важно, исходные образцы горных материалов разрушались. Объем кристаллографических решеток на разных материалах изменялся в пределах 1–6 %. Насыщенные легкими газами образцы весьма неустойчивы. Выдержка таких образцов в среде очищенного азота при нормальной температуре приводит к восстановлению исходной кристаллографической симметрии через 3–5 месяцев при непрерывном изменении объема решетки. Выдержка в вакууме существенно ускоряет этот процесс. Причем при вакуумировании исходных образцов, например оливина или кварцита, параметры структуры весьма быстро изменяются. Горные материалы оказы-

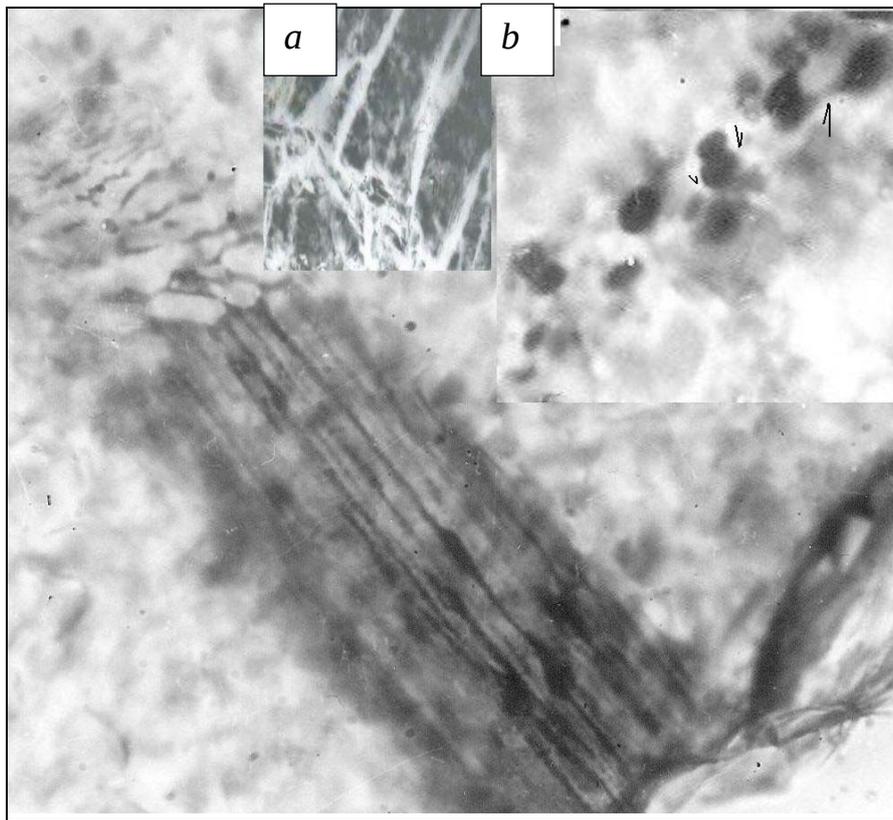
ваются весьма чувствительными к парциальному давлению легких газов в окружающем пространстве.

В лабораторных экспериментах при имплантации гелия и водорода показано формирование на горных материалах дополнительной пористости различного радиуса с высоким внутренним давлением газа, приводящим к образованию трещин вокруг пор. Имплантация гелия визуалью прослеживается в полосчатой структуре с характерной тонкой структурой струйного течения (рис. 6).

#### 4.2.2. ПОЛЕ ДЕГАЗАЦИИ ЗЕМЛИ И СТРУКТУРА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

В дегазации Земли участвуют  $H_2$ , He,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  (и его гомологи), CO,  $NH_3$ , соединения, содержащие Cl, F, S, инертные газы и др. Сброс газов в атмосферу и гидросферу весьма значителен: углеводороды –  $2 \cdot 10^{11}$  кг/год, азот –  $2 \cdot 10^{10}$  кг/год, водород –  $6 \cdot 10^9$  кг/год [Войтов, 1986]. На долю вулканизма приходится всего несколько процентов стока. Однако в проблемах планетарной дегазации Земли необходимо учитывать ряд деталей, отличающих геологическую среду от лабораторных объектов.

Граница Мохоровичича (граница М) делит среду на две зоны. Ниже границы М, вплоть до внешнего ядра, среда однофазна (только твердая фаза), и заметной может быть только восходящая диффузия легких газов по междуузельному механизму. Выше границы М имеем двухфазную среду: твердую фазу и флюид с растворенным газом (магматические каналы не рас-



**Рис. 6.** Тонкая дефектная структура кристалла оливина после имплантации гелия. X600. Врезки: *a* – общий вид полос с дефектной структурой. X60. Такие полосы пронизывают кристалл в различных направлениях, вдоль некоторых полос происходит дробление кристалла; *b* – цепочки пор, выделенные в направлении, перпендикулярном диффузии гелия. X300.

**Fig. 6.** Thin defect structure of an olivine crystal after helium implantation. X600. Inserts: *a* – general view of bands with the defect structure. X60. Such bands pierce the crystal in various directions; the crystal is fragmented along some of the bands; *b* – chains of pores in the direction perpendicular to helium diffusion. X300.

смашиваем). Здесь сток газа может идти через флюид и по каналу твердая фаза – флюид – твердая фаза (ТФТФ). На поверхности твердой фазы протекают реакции диссоциации молекул, далее переход в адсорбированное состояние и в твердый раствор, диффузия в твердой фазе и обратный процесс выхода молекул во флюид. Пористость среды не превышает нескольких процентов, поэтому основной поток дегазации идет по каналу ТФТФ. В граничных структурах ситуация может быть другой. Раздробленность и текстурированность граничной структуры делают ее более проницаемой, чем блоковая структура [Гуфельд, 2007]. Однако высокая концентрация легких газов в этих структурах может приводить к удивительным особенностям процессов, о чем речь пойдет ниже.

Второй момент. За геологические времена восходящие потоки легких газов и других элементов занимают устойчивые позиции в вакансиях и дефектах структуры. В реальной диффузии, которая может влиять на вариации параметров среды, наиболее активными следует считать водород и гелий, диффузия которых будет осуществляться по междуузельному меха-

низму (без захвата в уже занятые вакансии или другие дефекты). В направлении поверхности Земли температура будет уменьшаться, одновременно будет уменьшаться и коэффициент диффузии. Верхние слои станут барьером, ограничивающим процесс дегазации через твердую фазу. Это приводит к накоплению легких газов в различных горизонтах среды от верхней мантии до коры, а также формированию сейсмических границ (в том числе наклонных) и расслоению среды из-за влияния легких газов на структуру и упругие параметры [Гуфельд, 2007]. Естественно, что накопление легких газов в отдельных горизонтах не может быть долговечным. За счет градиента давления растворенных в твердой структуре легких газов и постоянной подкачки газов из глубины возможен их относительно быстрый переход в расположенные выше горизонты, т.е. реализуется эстафетный механизм переноса энергии снизу вверх. Именно этими процессами можно объяснить отмеченные выше наблюдения: появление сейсмических границ, чередование зон с повышенными и пониженными значениями скоростей продольных волн, вариации времен пробега продольных волн на

трассах подземных ядерных взрывов, быструю изменчивость (в течение суток) поля скоростей продольных волн в широком диапазоне глубин.

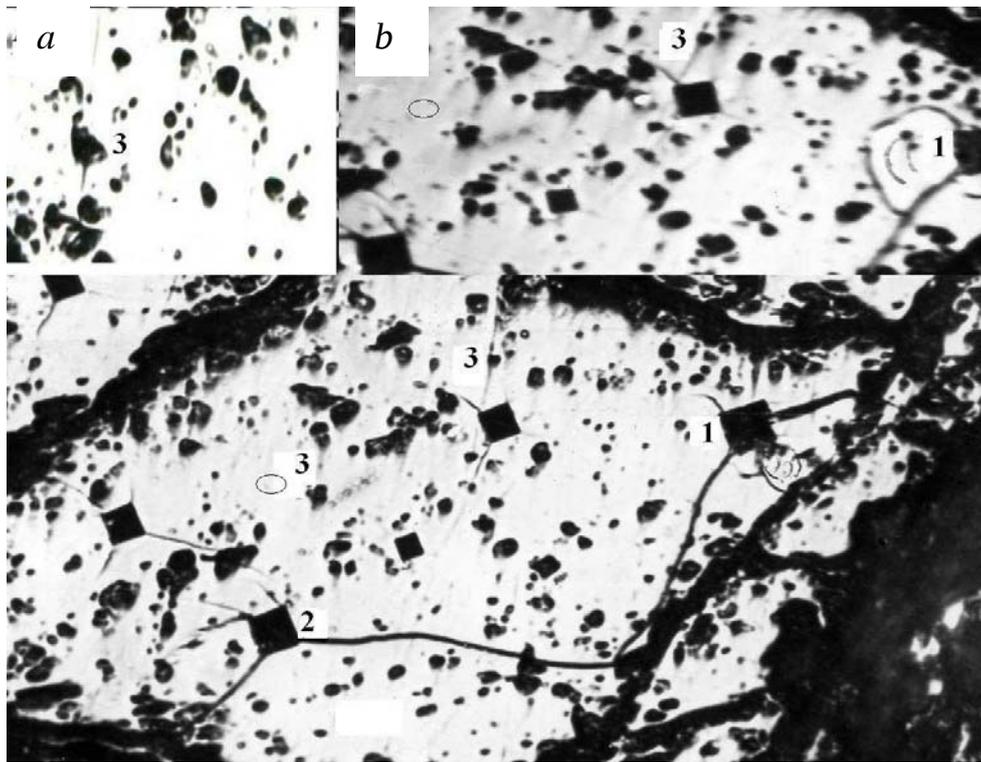
Отметим две основные особенности проявления эффектов дегазации. Первая особенность касается роли дегазации в индуцировании сейсмического шума, а вторая – формирования пространственно распределенных зон деструкции среды, масштабы которой можно представить только в планетарных условиях.

*Декомпрессионная модель сейсмического шума.* К сейсмическим шумовым полям (СШП) относятся колебания поверхностных структур земной коры в диапазоне периодов от сейсмоакустических (менее  $10^{-3}$  с) до микросейсмического ( $1-10^2$  с). СШП непрерывны, наблюдаются во всех регионах и отражают особенности пространственного распределения локальных процессов. Предметом дискуссий была природа сил, поддерживающих СШП. В сейсмическом шуме проявляются различные частоты внешних воздействий – штормовые микросейсмы, лунно-солнечные приливы и солнечно-суточная составляющая [Рыкунов, Смирнов, 1985; Хаврошкин, 1999; Sidorin, 2005]. Активизация источников СШП коррелирует с действием внешних фоновых полей, усиливая отклик, но не ослабляет его. Механизмы СШП связывали с излучением упругой энергии множеством мелких трещин и трением между подвижными элементами среды. Однако непрерывность процессов трещинообразования в принципе не может реализоваться, так как процесс трещинообразования дискретен, а плотность трещин ограничена. Расчеты показывают, что постоянно действующие фоновые поля (штормовые микросейсмы, лунно-солнечные приливы) не могут быть деформационными источниками непрерывного планетарного СШП, поэтому происхождение СШП связывают с процессами дегазации и динамикой газовых пузырей во флюиде. Подземные воды насыщены различными газами, процессы образования газовых пузырей, их всплытие и схлопывание сопровождаются излучением упругих волн в широком диапазоне частот, вплоть до ультразвуковых. С учетом того, что давление газа внутри пузыря должно уравниваться гидростатическим давлением и лапласовским давлением, интенсивное образование пузырей непосредственно во флюиде возможно на глубинах выше 200–400 м – эффект декомпрессии [Gufeld et al., 2008], носящий, как известно, взрывной характер. Количество флюида в различных геоструктурах коры достигает  $0.1-10$  кг/м<sup>3</sup> [Киссин, 2006]. Учитывая газовые потоки через блочные структуры [Войтов, 1986], интенсивность излучения упругой энергии газовыми пузырями укладывается в диапазон реального потока СШП –  $10^{-14}-10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>. Эти оценки подтверждены измерениями в глубоких водонаполненных скважинах [Гаврилов и др., 2006] и при контроле сейсмического шума в периоды воздействий упругих волн удаленных сильных землетрясений [Попова и др., 2007]. Наблюдения СШП показы-

вают, что геологическая среда активна – энергетически насыщена, и в мониторинге СШП отражается режим постоянной накачки и сброса энергии приповерхностным слоем за счет процессов дегазации.

*Деструкция геологической среды.* В связи с этим интересно напомнить данные сверхглубокого бурения [Кольская..., 1984]. Начиная уже с глубин 4–5 км образцы керны были с «саморазрушением», далее наблюдали прогрессирующее дискование (разрушение) керны до весьма малых размеров. Максимальные значения плотности и скоростей сейсмических волн, а также минимальную пористость фиксировали в верхней части разреза. Горное давление по разрезу скважины распределялось неравномерно: резкий спад или увеличение напряжений по сравнению с литостатическим давлением. Уже эти данные показывают, что структура извлеченного с глубины материала резко изменяется вне среды своего залегания, так же как и его свойства. Что означает ситуация с дискованием? Горный материал в среде остается «сплошным» только для прохождения упругих волн. В реальности материал пронизан сеткой связанных трещин и пор, заполненных газом под большим давлением и частично флюидом. С увеличением глубины концентрация водорода и гелия во флюиде увеличивается. Начиная с глубин 2.8–3.0 км содержание водорода становится преобладающим. С отметки около 6 км содержание гелия в воде становится соизмеримым с содержанием водорода, т.е. можно говорить о проявлении барьерного эффекта. Сейсмическая граница (около 7 км), которая ранее интерпретировалась как граница гранит – базальт, на самом деле представляет собой зону деструкции среды (зону трещиноватости), отражающую процессы взаимодействия легких газов с твердой фазой. Среда на глубинах больше 6 км переходит в разрушенное состояние – состояние деструкции, что соответствует также оценкам реологических свойств при соответствующих P–T условиях [Николаевский, 1980, 1982]. Лабораторное моделирование разрушения образцов при имплантации в них водорода и гелия подтверждает реальность такого состояния среды [Gufeld et al., 2011]. Таким образом, с учетом наличия газовой компоненты и последствий взаимодействия водорода и гелия с твердой фазой, внутриблоковая структура может быть глубоко текстурированной и раздробленной, локальная деформация и пластическое течение в ней будут контролироваться давлением газовой компоненты в порах и потоком междоузельной диффузии легких газов.

Неустойчивость горных материалов проявляется уже на исходных образцах, длительное время находящихся в почти нормальных условиях, т.е. вне среды. Покажем это на примере кристалла оливина, выделенного из гарцбургита [Gufeld et al., 2011]. Предварительно выбранная поверхность кристалла полировалась тонкой алмазной пастой и затем была слабо протравлена плавиковой кислотой (рис. 7). Осуществля-



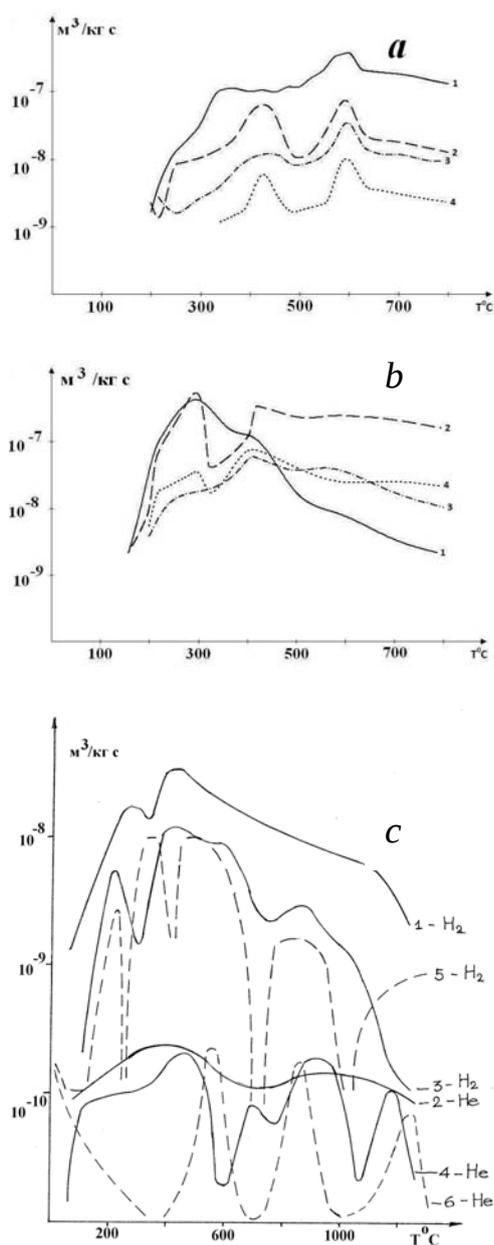
**Рис. 7.** Структура кристалла оливина, выделенного из гарцбургита, длительное время находившегося в нормальных условиях. X300. Нестабильность структуры кристалла активизирована нагрузкой алмазного индентора. Темные полосы и пятна – цепочки пор и отдельные поры. 3 – трещины у пор. Врезки: *a* – отдельная пора с микротрещиной, ниже нее – трещина между порами. X600. *b* – снимок через семь суток, слева и справа у отпечатка 1 просматриваются дислокационные розетки.

**Fig. 7.** The structure of the olivine crystal from harzburgite, which was in normal conditions for a long time. X300. Instability of the crystal structure was activated by load from the diamond indenter. Dark bands and spots show chains of pores and isolated pores. 3 – Fissures near pores. Inserts: *a* – an isolated pore with a micro fissure; below is a fissure between pores. X600. *b* – this photo was taken seven days late; dislocation rosettes are observed at the left and right sides of indenter impress 1.

лось микроиндентирование кристалла, т.е. измерение его микротвердости по размерам отпечатка алмазного индентора. Микротрещины около отпечатков индентора появлялись сразу или через несколько часов. На первые сутки у отпечатка 1 справа появилась дугообразная микротрещина с развитием внутри дислокационной розетки, в дальнейшем такая же структура появилась слева от отпечатка 1 (рис. 7,б). Наблюдали также закрытие микротрещин у алмазных отпечатков, являющееся следствием перераспределения напряжений. Длинная трещина между отпечатками 1 и 2 появилась на третьи сутки. Микротрещины наблюдаются также у некоторых микропор. Размеры отпечатка индентора зависят от прочностных показателей поверхностного слоя. Большие размеры отпечатков характерны для ослабленных зон пористости. На рисунке этим зонам соответствует микротвердость  $8.4$  и  $12.0 \cdot 10^3$  МПа. На 6–7-е сутки центр зоны изменил свой оттенок. Такое поведение материала отражает динамику неустойчивых структур (хотя образец имеет правильную кристаллографическую структуру и геологическое время

выдержан в нормальных условиях), причем внутри монокристалльных структур сформировалось ранее большое количество неравномерно распределенных газовых пор с трещинами около некоторых из них (рис. 7, врезка слева). Газовая пористость свойственна многим горным материалам, уже длительное время находящимся в нормальных условиях. Средний объем открытых пор составлял ( $10^{-3}$ , м<sup>3</sup>/кг): кварцит – 0.0021, лерцолит – 0.0043, гарцбургит – 0.0061, габбро – 0.0067, оливин – 0.0028, кварц – 0.002. Плотность пор такая, что расстояние между ними близко к длине дислокационного стока [Gufeld et al., 2011].

Дегазация исходных образцов горных материалов также показывает особенности сформировавшейся структуры. В качестве иллюстрации приведем особенности дегазации образцов кварцита (рис. 8). Синхронность дегазации различных газов связана с вскрытием множества пор за счет возникающих термических напряжений. Дегазация образцов слабо зависит от температуры, что вызвано уже существующей системой связанных микротрещин и пор. С учетом количества



**Рис. 8.** Зависимость скорости дегазации кварцита и оливина от температуры: *a* – кварцит, без предварительной обработки: 1 – H<sub>2</sub>O, 2 – CO, 3 – H<sub>2</sub>, 4 – N<sub>2</sub>; *b* – оливин монгольский, без предварительной обработки: 1 – H<sub>2</sub>O, 2 – CO, 3 – H<sub>2</sub>, 4 – N<sub>2</sub>; *c* – оливин монгольский. 1 и 2 – дегазация исходных образцов, 3 и 4 – после имплантации водорода, 5 и 6 – после имплантации гелия. Справа от цифр указан газ, контролируемый масс-спектрометрически. Для процессов дегазации характерны синхронные всплески выхода различных газов, что связано с исходной микротрещиноватостью и вскрытием пор за счет температурных напряжений.

**Fig. 8.** Dependence of velocity of degassing of quartzite and olivine from temperature. *a* – quartzite, without preliminary treatment: 1 – H<sub>2</sub>O, 2 – CO, 3 – H<sub>2</sub>, 4 – N<sub>2</sub>; *b* – Mongolian olivine, without preliminary treatment: 1 – H<sub>2</sub>O, 2 – CO, 3 – H<sub>2</sub>, 4 – N<sub>2</sub>; *c* – Mongolian olivine. 1 and 2 – degassing of initial specimens; 3 and 4 – after hydrogen implantation, 5 and 6 – after helium implantation. Types of gases controlled by mass-spectroscopy are marked at the right of numbers. Degassing processes are characterized by synchronous bursts of emissions of different gases due to initial micro-fracturing and opening of pores by thermal stresses.

потерянных образцами газов и средней пористости оценено давление газов в закрытых порах: при 20 °C – порядка 0.1–0.2 кбар, а при 350 °C – 0.6–0.7 кбар (1 кбар=100 МПа). Оценки относятся к образцам, в которых за длительное время сформировалась равновесная структура и пористость. Эти исследования показывают, что газ сосредоточен преимущественно в порах, а примерно треть общего количества гелия и водорода находится в вакансиях, дегазация из которых наблюдалась при температуре плавления [Gufeld et al., 1997; Gufeld et al., 2011]. Особенности дегазации горных материалов на примере монгольского оливина и пироксена после их насыщения гелием или водородом были рассмотрены в работе [Гуфельд и др., 1998]. Импульсная дегазация протекала на всем температурном интервале. Отсюда следует, что в изучаемых образцах газы также находятся преимущественно в порах, часть из которых связана между собой системой мелких трещин.

Дегазация легких газов проявляется в различных процессах, контролируя при этом специфическую структуру среды, ее деструкцию (на глубинах от 5–6 км и примерно до границы М), слабые вариации ОНС и перенос энергии в верхние оболочки Земли. Отметим, что при высоком уровне деструкции среда сохраняет свою целостность за счет литостатического давления, а устойчивую и разветвленную блоковую структуру контролируют, по-видимому, особые, еще не понятые по параметрам, граничные структуры на тех же глубинах, существенно отличающиеся от поверхностных структур.

#### 4.2.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ГЛУБИННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СТРУКТУРЫ И ПРИЗЕМНУЮ АТМОСФЕРУ

В период подготовки сильных землетрясений наблюдается интенсивная разгрузка из поверхностных слоев природных газов, растворенных во флюиде и твердой фазе. Разгрузку природных газов сопровождают вариации уровня подземных вод, которые в совокупности отражают региональную динамику деформационных процессов в среде [Вартанян и др., 1990; Монахов, Киссин, 1980]. В период подготовки сильных землетрясений гидродинамические и геохимические аномалии проявляются на региональном масштабе. Ареалы этих аномалий имеют мозаичную структуру. В пределах одного ареала в одной скважине может увеличиться концентрация углеводородов за счет азота и двуокиси углерода, в другой – азота и инертных газов за счет углеводородов, в третьей – двуокиси углерода. Аналогичным образом может изменяться микрокомпонентный состав газов. При этом гидродинамические и геохимические аномалии возникают почти одновременно [Соболев, 1993; Осика, 1981]. Отдельно необходимо остановиться на динамике дегазации водорода и гелия. При подготовке сейсмических событий разгрузка молекулярного водорода из скважин и минеральных

источников имеет импульсный характер, увеличиваясь на порядки относительно фона [Войтов, 2002; Firstov, Shirokov, 2005]. Наблюдалась разгрузка гелия из флюида перед сейсмическими событиями. В меньшей мере разгрузка природных газов наблюдается в фоновый период. Эти наблюдения, так же как и наблюдения других параметров среды, трактуемые как предвестники, фиксируются непосредственно в поверхностных слоях земной коры. Точки же вспарывания крупномасштабных разрывов находятся, для наиболее опасных сейсмических явлений, на глубине 10–30 км. Сам поверхностный слой практически не напряжен, он испытывает воздействие в большей степени фоновых полей: приливов, метеофакторов, сейсмических волн отдаленных землетрясений и др. Связь между глубинными и поверхностными структурами может осуществляться через восходящий поток легких газов. Накопление легких газов и, возможно, комплексов типа С–Н и Н–Н в верхних слоях геологических структур за счет барьерного эффекта, формирование зон деструкции, как горизонтальных, так и наклонных, и неустойчивость этих состояний будут приводить к вариациям на различных масштабных уровнях ОНС, протекающего с изменением объема элементов среды.

Лабораторные доказательства неустойчивости горных материалов при имплантации в них легких газов могут быть распространены на условия геологической среды [Гуфельд, 2007]: 1. Концентрация легких газов в твердых фазах литосферы, даже по отдельности (Н или He), достаточна для перевода кристаллических структур в неустойчивое состояние. Реально эта концентрация еще ниже. Так, после дегазации образцов и последующей их термообработки в гелиевом вакууме ( $10^{-8}$  МПа), были также получены структуры с нарушением кристаллической симметрии. 2. Структурные переходы при диффузии легких газов в горных материалах, в отличие от фазовых переходов, не требуют критических температур и давлений, протекают заметно при нормальных температурах.

Рассмотрим возможности крупномасштабного деформирования литосферы за счет внутривещного давления легких газов. Приведем оценки только для потоков гелия. Использовались минимальные концентрации гелия для океанической ( $<10^{15}$  атомов/г) и континентальной ( $10^{17}$  атомов/г) коры [Азбель, Толстихин, 1988]. Концентрация водорода в твердой фазе выше на 2–3 порядка. В диапазоне температур 200–600 °С и микропорах с радиусом  $r=10^{-8}$ – $10^{-3}$  м внутривещные давления только за счет диффузии и скопления в них гелия могут достигать величин  $10^3$  МПа и более. Такие давления достаточны, чтобы вызвать локальную деформацию, проявляющуюся первоначально в виде полос скольжения [Доброжинская, 1988], развивающихся в дальнейшем в микротрещины. Такие микротрещины наблюдались вокруг пор (см. рис. 7). Трещины, идущие от пор, обнаружены также на исходных образцах.

Для реализации крупномасштабного деформирования необходимо соблюдение двух условий. Первое условие определяет требование к концентрации микропор: расстояние между микропорами должно иметь порядок длины дислокационного стока. Анализ плотности пористой структуры показывает, что это требование реализуется, длина дислокационного стока составляет десятки микрон (см. рис. 6 и 7). Второе требование выражает условие нарушения равновесия вокруг поры [Гуфельд и др., 1993; Гуфельд, 2007]:

$$P - \frac{2\gamma}{r} > \frac{\sigma b}{r} + L$$

где  $P$  – внутривещное давление газа,  $\gamma$  – поверхностная энергия,  $\sigma$  – модуль сдвига,  $b$  – вектор Бюргера,  $L$  – литостатическое давление. Это требование также выполняется (см. рис. 6 и 7). Для приведенных концентраций гелия эти условия реализуются при  $L < (1-1.5) \cdot 10^3$  МПа (глубины меньше 30–35 км, т.е., примерно до границы Мохоровичича) и равномерном распределении микропор с радиусами  $10^{-8} \text{ м} < r < 10^{-6} \text{ м}$ . Монотонное увеличение плотности с глубиной увеличивает энергию образования вакансий и, следовательно, уменьшает возможности формирования газовой пористости. Возможно, граница М является предельной, ниже которой микроскопическая пористость отсутствует или существенно ограничена. В то же время субмикроскопическая пористость, образованная межатомными полостями (тетра- или окта-поры), наиболее вероятна и может контролировать скоростные параметры среды. Однако в одиночных вакансиях и субмикроскопических порах с  $r \sim 1$  нм, что соответствует захвату 1–5 атомов He (или/и H), плотность газа значительно выше плотности жидкого гелия и может представляться как твердое состояние. Эти устойчивые «вакансионные» образования в структуре могут влиять на реологические свойства среды. Однако присутствие в среде водорода, концентрация которого выше на три порядка, делает менее критичными условия формирования газовой пористости, несколько увеличивая глубину образования микропор.

Захват гелия и водорода дефектами структуры, прежде всего вакансиями, как уже отмечалось, существенно ограничивает их подвижность. С учетом, что существует долговременный и переменный восходящий поток легких газов, влияние на динамические явления в среде будет оказывать восходящий поток, контролируемый междоузельным механизмом диффузии. Коэффициент диффузии здесь может достигать значений  $D \approx 10^{-9}$ – $10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с и существенно более высоких в диапазоне 200–600 °С.

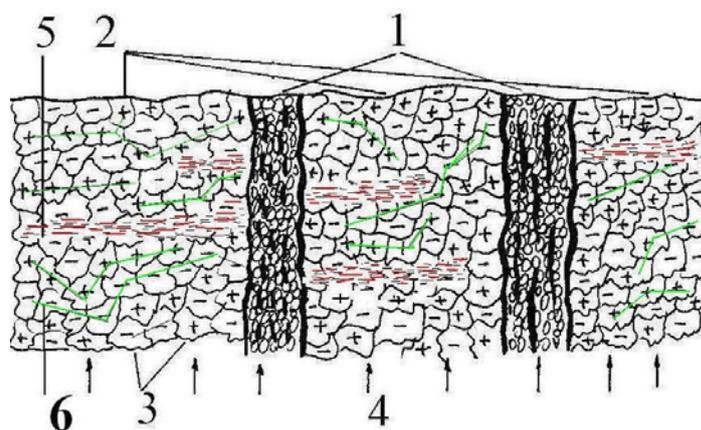
Плотность восходящего потока легких газов не одинакова в различных зонах и изменяется во времени. На скорость восходящего потока оказывают влияние лунные приливы, упругие волны отдаленной

сейсмичности, геологические особенности среды, т.е. блочные, межблочные или разрывные структуры различного ранга. Любая локализованная по глубине зона при взаимодействии с восходящим потоком легких газов будет испытывать периодические вариации объема: растяжение – сжатие – растяжение. За счет модуляции восходящих потоков легких газов и барьерного эффекта по глубине установится динамическое чередование зон сжатия и растяжения (рис. 9). Фактически можно говорить о режиме деформационной волны (или эстафетном механизме передачи энергии), распространяющейся в направлении потока легких газов [Гусев, Гуфельд, 2006]. Очевидно, что вариации ОНС среды в смежных зонах не будут синхронными. При квазипостоянных градиентах давления и температуры в литосфере влияние на поле напряжений легко подвижных восходящих потоков легких газов представляется основным переменным фактором, поддерживающим непрерывные вариации различных параметров среды, в том числе фоновой – слабой внутривлажной сейсмичности, обусловленной нарушением аккомодации, т.е. переупаковкой соседних элементов среды. Непрерывность и разномасштабность вариаций различных полей в период активной разгрузки природных газов позволяли ретроспективно «подобрать» сильным землетрясениям подходящее локальное «возмущение (предвестник)» какого-либо параметра (на расстоянии до 1000 км от эпицентра и в период от суток до многих лет – такова была практика анализа) [Соболев, 1993; Моги, 1988; Трапезников, 1993].

Заключительным актом разгрузки природных газов будут процессы, сопровождающие их выход в приземную атмосферу. Наиболее интенсивным будет выход газов по границам блоков, через разрывные структуры. Сверхфоновый сброс таких газов, как  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  (также его гомологов), приводит к локальным проявлениям парникового эффекта, который действительно наблюдается в инфракрасном поле вдоль граничных структур протяженностью в тысячи километров непосредственно перед сильными землетрясениями [Горный и др., 1988]. Эффекты дегазации оказывают влияние на процессы в атмосфере. Следствием дегазации рассматривают проявления линейных облачных структур над разломами [Морозова, 2005]. Отметим, что эффекты декомпрессии способствуют выбросу в приземную атмосферу более широкого круга газов, находящихся во флюиде поверхностного слоя. Наблюдается также прямая связь динамики озоновых дыр с водородной дегазацией Земли (вне связи с сейсмичностью), причем озоновые дыры сопряжены с зонами наиболее активной дегазации – горячими точками и глобальной системой разломов [Сывороткин, 1996].

#### 4.3. МЕЖБЛОКОВЫЕ СТРУКТУРЫ

Межблочные структуры играют существенную, если не определяющую, роль в тектонической жизни



**Рис. 9.** Деформационная структура земной коры, обусловленная переменным восходящим потоком легких газов. 1 – границы блоков; 2 – блоки; 3 – области растяжения и сжатия; 4 – направление восходящих потоков легких газов; 5 – области деструкции (повышенной трещиноватости); 6 – изолинии близких скоростей сейсмических волн в различных структурах.

**Fig. 9.** Deformation structure of the Earth's crust which is determined by intermittent ascending flows of light gases. 1 – boundaries of blocks; 2 – blocks; 3 – extension and compression areas; 4 – direction of ascending flows of light gases; 5 – areas of destruction/increased fracturing; 6 – isolines of similar velocities of seismic waves in different structures.

Земли. Ширина межблочных структур, зон разломов и областей их динамического влияния [Шерман и др., 1983] достигает сотен метров и более, а для планетарных разломов – десятков километров. За счет взаимодействия блоков прослойка между ними сильно раздроблена, и непрерывное деформирование приводит к ее текстурированию, которое проявляется в анизотропии свойств. Наряду с медленными долговременными смещениями устойчивых блочных структур относительно друг друга по раздробленной межблочной среде, существуют весьма короткие интервалы времени, когда реализуется динамический режим сдвига (сброса, взброса и т.д.) – «крупномасштабной трещины», локализованной вдоль крупномасштабной поверхности скольжения. Это означает, что развитие «крупномасштабной трещины» по «трещинам» раздробленной межблочной среды могло произойти только после кратковременной совместной консолидации межблочной среды и окружающих ее блоковых структур на различном масштабном уровне. Масштабный уровень блокировки может контролироваться флюидно-газовым взаимодействием межблочного пространства с распределенными по глубине зонами деструкции в смежных блоках. На высокую степень блокировки движения блоков или консолидации блоковых структур указывает характер развития КР. Практически подвижка («разрыв») отражает поверхность скольжения – зеркало скольжения (рис. 10)



**Рис. 10.** Плоскость разлома с обширными зеркалами скольжения. Отмечаются следы пленочного плавления [Ружич, 2009]. Однако эта структура поверхности скольжения не соответствует реальной структуре на глубинах, больших 4–5 км.

**Fig. 10.** Fault plane, and wide slickensides. Film melting traces are noted [Ружич, 2009]. This slickenside structure does not correspond to the actual structure at depths over 4 to 5 km.

[Ружич, 2009], что может быть характерно для предельно консолидированных структур. На интенсивность и локализацию протекающих процессов указывает «пленочное» плавление поверхности скольжения, причем сформировавшийся протяженный граничный слой скольжения по глубине должен быть весьма устойчив во времени. Однако исследуемые образцы из верхних слоев коры, скорее всего, уже не отражают реальные структуры граничных слоев на глубинах более 5–6 км. Моделирование реальных условий граничного скольжения еще впереди.

Изучение структуры элементов межблоковой среды показывает ее существенные особенности, обеспечивающие взаимное перемещение блоков относительно друг друга [Родкин, 2006; Rodkin 2006; Ребецкий, 2006, 2009; Чиков и др., 1989; Чиков, 1992; Skvortsova, 2004; Шерман и др., 1983; Шерман, 2009; Sherman, 2009]. Взаимодействие флюида с твердой фазой за счет эффекта Ребиндера, твердофазных реакций и реакций твердой фазы на диффузию в ней водорода и гелия приводит к дополнительному разрушению отдельных элементов среды и формированию пористости, кон-

тролирующих в конечном итоге активную циркуляцию флюида в межблоковом пространстве. Можно полагать, что эти процессы будут наиболее интенсивны в зонах, в которых будет проявляться барьерный эффект. Параметры межблоковой среды изменяются во времени, причем эти процессы имеют период, сопоставимый с текущим масштабом времени. В коровом слое межблоковые структуры состоят преимущественно из полевого шпата, кварца (кварцита), плагиоклаза, пироксена, роговой обманки и др., образующих конгломерат, известный как гранит. Раздробленные элементы различного масштаба, находящиеся в межблоковой среде, в том числе в зонах, прилегающих к блокам, представляют многофазную смесь. Структура в осевой части межблочной среды в меньшей степени испытывает внешнее воздействие. Процесс диспергации в межблоковой среде наиболее активен в зоне, примыкающей к блоковой структуре. При этом размеры зерен в элементах среды, находящихся ближе к блоковой структуре (милонитовая, т.е. мелкозернистая структура), существенно меньше, чем в осевой зоне межблоковой среды. Эта часть структуры контрастно

выделяется, и вдоль нее происходит взаимное смещение блоков относительно друг друга. Относительные смещения блоков отражают режим граничного трения, реализуемый за счет сдвиговой деформации раздробленных элементов и их аккомодации по отношению друг к другу. При этом следует иметь в виду, что P–T условия существенно меняются по глубине и крупномасштабное движение каждого из блоков может поддерживаться только единым крупномасштабным механизмом реидной деформации, осуществляющим объемное течение вещества (блоков) вдоль граничных структур.

Обнаружены также интенсивные локальные аномалии современных движений земной поверхности, приуроченные к зонам разломов различного порядка [Кузьмин, 1996, 2002; Кузьмин, Жуков, 2004]. Эти аномальные движения были высокоамплитудны (50–70 мм/год), короткопериодичны (0.1–1.0 года), пространственно локализованы (0.1–1.0 км), обладали пульсационной и знакопеременной направленностью. Очень высоки были также скорости относительных деформаций ( $10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-5}$  в год), обусловленные влиянием малых внешних воздействий природного (упругие волны отдаленных землетрясений, выпадение атмосферных осадков) и техногенного (изменение режима добычи нефти) характера. Отметим, что ситуация аналогична активизации микросейсмического шума, причем глубина зоны, деформация которой отражается в современных движениях земной поверхности, точно не определена, однако можно полагать, что это поверхностный слой. Природу аномалий связывают с флуктуациями параметров среды внутри разломных зон (не связанных с региональной составляющей процесса), одной из основных причин которых могут быть процессы, обусловленные быстрой разгрузкой среды за счет выхода легких газов.

Можно было полагать, что особенности деформационных процессов в межблоковых границах определяются сформировавшейся структурой и действием сил, контролирующих движение блоков и их блокировку.

## 5. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ ОНС СРЕДЫ И ЕГО СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

Следствием взаимодействия переменных восходящих потоков легких газов с твердой фазой, при которых происходят разномасштабные вариации структуры и объема ее элементов, будут непрерывные изменения упругих модулей среды [Гуфельд, 2007]. Это приводит к «колебательному» режиму ОНС блочной среды на различных пространственно-временных масштабах, влияющему в большей или меньшей степени на характеристики взаимного смещения блоков и на слабую сейсмичность (за счет нарушения аккомодации элементов структуры) внутри блочных структур

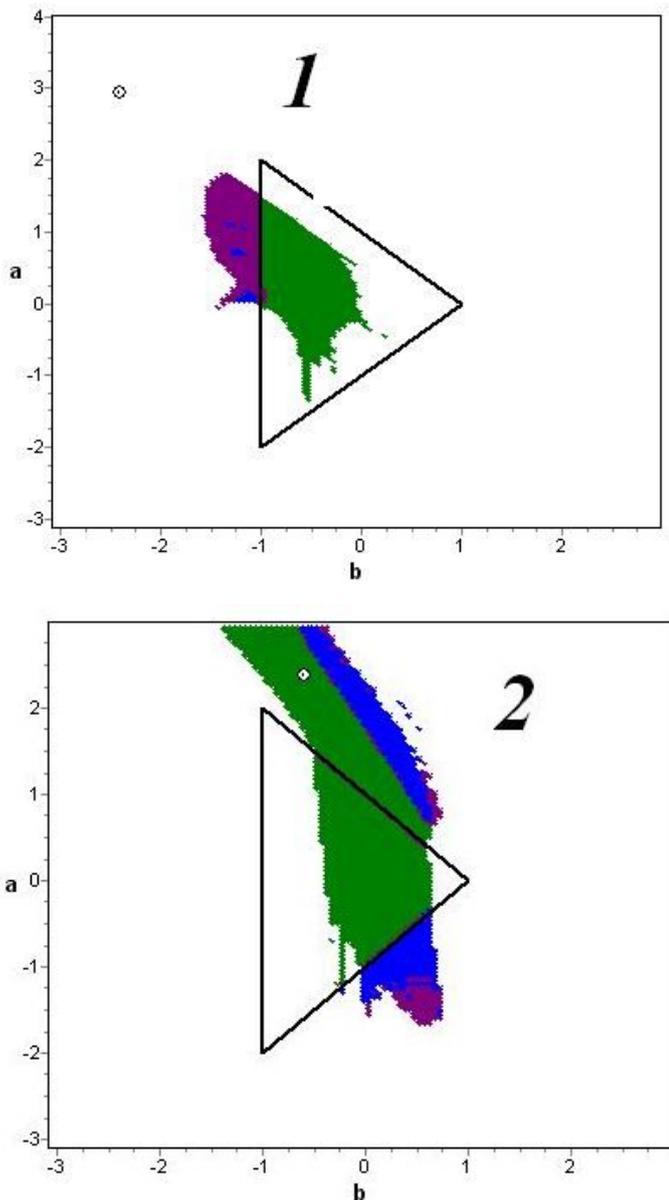
(см. рис. 10). Отражением колебательного режима ОНС среды является волновой характер изменения практически всех параметров среды, включая слабую сейсмичность [Соболев, 1993; Соболев, Пономарев, 2003]. Колебательный режим ОНС среды можно наблюдать в мониторинге структурно чувствительных скоростей продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн ( $V_p/V_s \sim 1.15 (E/\mu)^{1/2}$ , где  $E$  и  $\mu$  соответственно модули Юнга и сдвига, а коэффициент Пуассона принят равным 0.25–0.35). Описание колебательного режима ОНС среды как динамической системы проводилось на основе анализа решений разностного уравнения второй степени и второго порядка [Новоселов, 2010]:

$$x_{k+2} = a x_{k+1} + b x_k + c x_{k+1}^2 + d x_k^2, \quad (1)$$

где  $x$  – текущие значения контролируемого параметра, отражающего вариации отношения скоростей  $V_p/V_s$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$  при первых степенях – параметры функционирования системы, определяющие тип ее колебательного поведения как коллектива элементов. Они характеризуют устойчивость или неустойчивость функционирования системы, наглядно определяемые на плоскости в безразмерных координатах  $a$  и  $b$  областью сходящихся (ОСР) или несходящихся решений (рис. 11). Координаты точек состояния среды  $a$  и  $b$  при устойчивом динамическом режиме лежат в ОСР, а при неустойчивом – вне ОСР. Коэффициенты  $c$  и  $d$  при квадратичных членах контролируют энергетические процессы, связанные с внешними воздействиями или сбросом энергии средой. Значения  $(c+d) > 0$  соответствуют накачке среды энергией, а значения  $(c+d) < 0$  – сбросу энергии [Козак, Новоселов, 1999; Новоселов, 2010]. Такой анализ динамического поведения среды открывает новые возможности в оценке сейсмотектонических ситуаций.

Анализ данных интегрального  $V_p/V_s$  [Славина и др., 2005а] мониторинга для Камчатского полигона на трассах в первые сотни километров показал, что действительно существуют интервалы устойчивого и неустойчивого состояния среды [Gufeld et al., 2010]. Наблюдался весьма быстрый переход от одного состояния к другому. Время этих переходов составляло от 2–3 до 7 суток. Продолжительность устойчивого и неустойчивого состояния достигала двух месяцев, а в пространстве в один период времени они были распределены мозаично (рис. 12).

Для большинства временных интервалов анализа по всем станциям независимо от динамического состояния среды величина  $(c+d) < 0$ , что отражает сброс энергии средой. Однако существуют короткие временные интервалы, для которых величина  $(c+d) > 0$ , т.е. проявляется накачка среды энергией. Реально же процессы накачки и сброса энергии (связанные с восходящим потоком водорода и гелия) протекают одновременно, поддерживая слабые вариации параметров энергона-



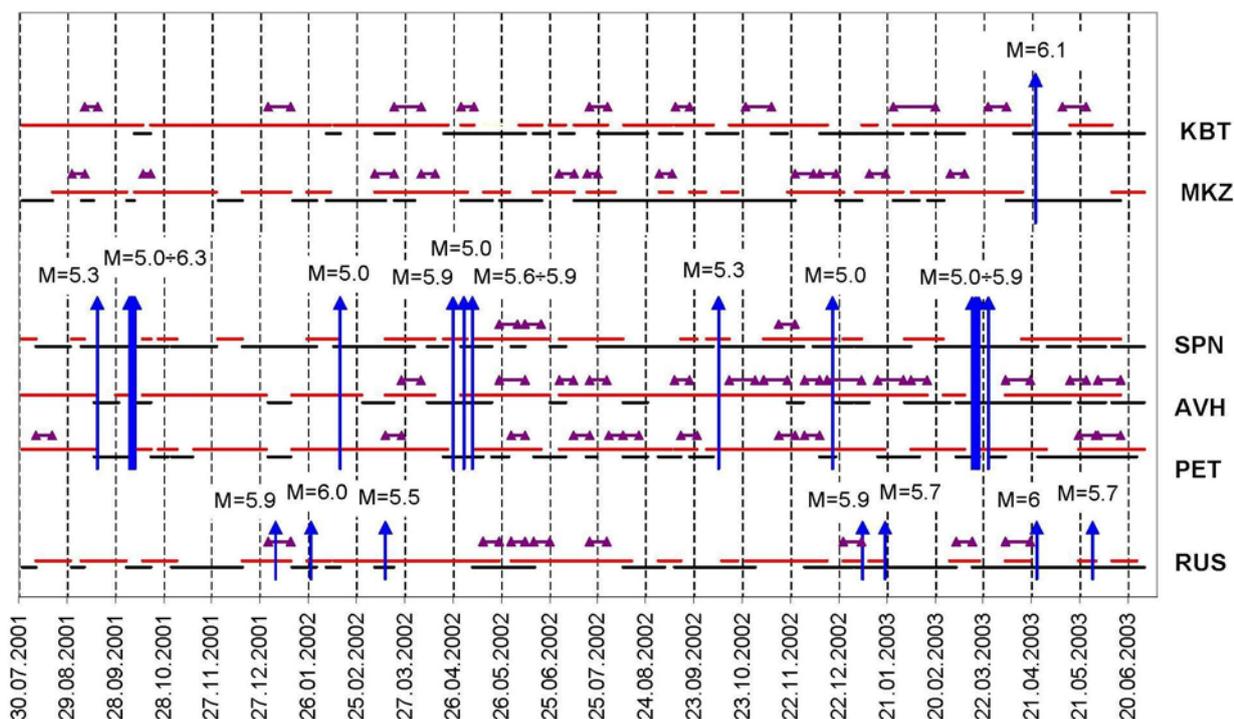
**Рис. 11.** Параметры контролируемой системы. 1 – неустойчивое колебательное состояние системы; 2 – устойчивое колебательное состояние. Зеленая область – область сходящихся решений, белая точка – положение системы в данный период, фиолетовая и синяя области отражают незатухающие колебательные решения различного типа (циклические, хаотические и др.), белая – область расходящихся решений. Координаты точек состояния среды  $a$  и  $b$  при устойчивом динамическом режиме лежат в области сходящихся решений, а при неустойчивом (катастрофическое состояние системы) – вне этой области. Треугольник – состояние системы при  $c=d=0$ .

**Fig. 11.** Parameters of the controlled system. 1 – unstable oscillatory state; 2 – stable oscillatory state of the system. Green – area of convergent solutions; white dot – position of the system in the given period; purple and blue areas – continuous oscillation solutions of various types (cyclic, chaotic etc.); white area – area of divergent solutions. Coordinates of points of the state of the medium,  $a$  and  $b$ , are within the area of convergent solutions in case of stable dynamic regime, and outside this area in case of unstable regime (catastrophic state of the system). Triangle – state of the system when  $c=d=0$ .

сыщенной среды (но не самого поверхностного слоя) вблизи предельного уровня [Гуфельд, 2007].

Период неустойчивого функционирования среды отличается сбросом энергии в блоковых структурах. Интенсивный и разномасштабный колебательный режим ОНС блоковой среды в эти периоды может оказывать триггерное действие (аналог слабых силовых воздействий на предельно нагруженные образцы) на режим движений самих блоков (независимо от механизмов, вызывающих движение блоков: вертикальная аккреция вещества или плитовая тектоника), поддерживая тем самым фоновый сейсмический процесс в граничных структурах, включая «тихие» землетрясения. В короткие периоды устойчивого состояния среды происходили сильные сейсмические события с  $M > 5$ . Устойчивое функционирование среды способствует частичной блокировке движения блоков и накоплению на границах дополнительной упругой энергии при ограниченном движении блоков [Гусев, Гуфельд, 2006; Гуфельд, 2007], заканчивающееся крупномасштабным разрывом. В связи с этим можно сделать вывод, что сеймотектонические ситуации в значительной мере контролируются интенсивностью восходящих потоков легких газов, их пространственной распределённостью в конкретный период и степенью разгрузки природных газов в поверхностный слой коры. Интегральный мониторинг параметра  $V_p/V_s$  позволяет контролировать динамические характеристики среды и подтверждает непрерывность изменения параметров среды на различном пространственном масштабе (не только на локальном). Он также показывает, что мы имеем дело со средой, динамическое поведение которой нельзя описать в рамках только представлений механики разрушения. Кроме того, появляется возможность анализа периодичности устойчивых и неустойчивых состояний среды на различных пространственных масштабах [Gufeld et al., 2010; Новоселов, 2010a]. При этом уже будут учитываться геологические факторы, без которых нельзя искать признаки, указывающие на подготовку сильных землетрясений. Отметим, что триггерный эффект действия колебательного режима блоков представляется наиболее сильным, по сравнению с другими фоновыми полями, и постоянно действующим фактором в объеме предельно энергонасыщенной среды. Учитывая выше изложенное, можно говорить о том, что существует краткосрочный период скрытого формирования крупномасштабных структур разрушения. Ситуация, по нашему мнению, аналогична формированию инфаркта миокарда. В медицине задачей является выявление и контроль скрытого формирования инфаркта до его клинического проявления [Егорова, 2002], в геофизике – обнаружение скрытно формирующихся границ разблокировки (деструкция граничных структур) движения блоков при слабо меняющихся динамических параметрах системы.

Естественно, что возникает вопрос, какая зона трас-



**Рис. 12.** Периоды устойчивого (горизонтальная черная линия) и неустойчивого (красная линия) состояния среды фокальной зоны Камчатского полигона, контролируемые раздельно каждой из шести станций (индексы станций – справа). Вертикальные линии – сейсмические события, происходящие преимущественно в периоды устойчивого состояния. Линии между треугольниками – периоды с преобладающей накачкой среды энергией, т.е.  $c+d > 0$ .

**Fig. 12.** Periods of stable (black horizontal line) and unstable (red line) state of the medium of the focal zone of the Kamchatka polygon, according to independent records by six monitoring stations. Numbers of the stations – at the right. Vertical lines – seismic events, most of which occurred during stable-state periods. Lines between triangles – periods when accumulation of energy by the medium was dominant, i.e.  $c+d > 0$ .

сы преимущественно контролируется в мониторинге изменения  $V_p/V_s$ . Анализ показывает, что преимущественный вклад в изменения параметра вносят процессы в фокальной зоне. Динамическое состояние материковой части Камчатки по параметру  $V_p/V_s$  не соответствует динамическому состоянию прилегающей фокальной зоны, что указывает на слабое силовое взаимодействие этих зон.

## 6. УСЛОВИЯ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сейсмические явления в граничных и внутриблоковых структурах контролируются непрерывными флуктуациями энергии относительно почти предельного фонового уровня и индуцируются слабыми вариациями ОНС среды. Слабые вариации энергии в предельно энергонасыщенной и трещиноватой среде в определенных условиях приводят к блокировке границ движущихся блоков, поэтому под очагом конкретного сильного землетрясения на платформах нужно понимать связанное состояние двух-трех блоков, ограничивающее их перемещение относительно друг друга. При ограничении движения блоков возможно накопление

дополнительной энергии на граничных структурах. Очевидным является и то, что процессы подготовки очагов сильных землетрясений не обусловлены процессами взаимодействия трещин различного ранга [Моги, 1988; Соколов, 1993; Соколов, Понаморов, 2003], а связаны с особенностями взаимодействия блоков [Садовский и др., 1987, Садовский, Писаренко, 1991; Гамбурцев, 2003; Гуфельд, 2007; Gufeld, 2008]. Напомним, что движение каждого из блоков рассматривается на основе процессов структурно-вещественной (физико-химической) трансформации горных пород в зонах взаимодействия верхней мантии и нижней коры, нижней и верхней коры, а также в выше лежащих слоях [Вертикальная аккреция..., 2002; Летников, 2000], причем движения блоков препятствуют появлению связанных блочных состояний. Это наиболее явно наблюдается в фоновый период. Следовательно, мы должны рассматривать реакцию упругой и жесткой верхней части блочной структуры коры на движения в нижней оболочке, испытывающей структурно-вещественные преобразования.

Сильная и средняя сейсмичность на границах блоков была рассмотрена с учетом реакции среды на взаимодействие с восходящими потоками легких газов

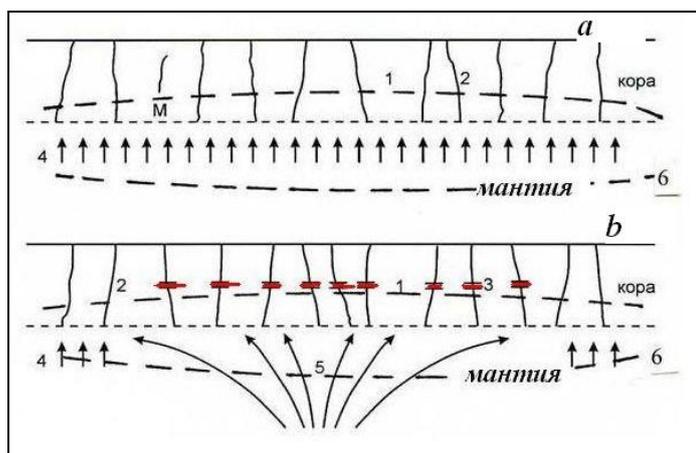
[Гуфельд, 2007; Gufeld, 2008]. Для оценки реальности процессов блокировки граничных структур за счет действия восходящих потоков легких газов необходимо сравнение их действия с величиной предельной деформации крупномасштабных структур, близкой к величине 0.0001. Предельная деформация для образцов (0.01–0.06) существенно выше предельных деформаций крупномасштабных структур литосферы. Поэтому можно ожидать, учитывая особенности диффузии водорода и гелия в кристаллических структурах горных материалов, что деформации в литосфере, близкие к предельным, будут достигаться при весьма небольших потоках водорода и гелия, близких к тем, которые наблюдаются на поверхности [Войтов, 1986]. При этом необходимо учитывать вклад термических процессов в блокировку границ. При экзотермических реакциях водорода с другими атомами водорода и углеводородами в поровом пространстве конечном итоге образуются вода и метан. Эта реакция наиболее интенсивно идет при температурах 400–600 °С, т.е. в зонах выше границы М, где находятся гипоцентры крупномасштабных разрывов. Учитывая реальный коэффициент термического расширения среды  $\alpha \sim 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$  1/град, предельные деформации литосферы будут достигнуты при повышении температуры всего на  $\Delta T \approx 10 - 20$  °С ( $\epsilon = \alpha \cdot \Delta T$ , где  $\epsilon$  – предельная деформация). Для реализации таких тепловых эффектов концентрация диффундирующего водорода в твердой фазе должна быть около  $10^{-7}$  м<sup>3</sup>/кг, что существенно ниже его реальной концентрации в литосфере. Блокировка границ возможна при еще меньшем повышении температуры и деформациях меньше предельных. Реакцией предельно энергонасыщенной среды на эти процессы будут обратимые изменения интегрального объема внутриблочных структур: расширение (консолидация) – сжатие – расширение, приводящие к блокировке и разблокировке движения блоков. Однако такая крупномасштабная ситуация, в отличие от локализованных процессов, может быть связана с уникальными особенностями проявления региональной дегазации.

Процессы дегазации Земли на современном этапе геологического развития носят слабопеременный характер. На этом фоне проявляются импульсы дегазации (эндогенная активизация [Маракушев, 1992; Letnikov, Dorogokupets, 2001]) на различных пространственных масштабах, от локального (в пределах нескольких блоков или отдельных граничных структур) до регионального. Можно говорить о трех сценариях развития сейсмотектонических ситуаций для платформенных зон, подчеркнем это (рис. 13) [Gufeld, 2008]. В первом реализуется слабопеременный характер дегазации, все границы разблокированы. Это фоновый режим, движение каждого из блоков напоминает клавишную систему (по аналогии с выражением Л. Лобковского), действие которой обусловлено особенностями реидной деформации в низах каждого из блоков. Во втором сценарии эндогенная импульсная активиза-

ция реализуется в масштабах двух-четырех блоков (локальная активизация) и блокируется движение только этих блоков относительно друг друга. Соседние блоки продолжают естественный режим движения. Вероятность разблокировки крупномасштабным разрывом одной из границ мала, так как наиболее вероятно, что связанные блоки будут совершать совместный режим движения, вызывая возмущения различных полей литосферы. Разблокировка границ будет происходить по мере затухания эндогенной активности и реализации реидной деформации блоков. Третий сценарий, эндогенная импульсная дегазация, вызывает блокировку граничных структур в региональном масштабе. Отражением появления пространственно связанной блочной структуры может быть кольцевая сейсмичность, относительное сейсмическое затишье, миграция очагов слабых землетрясений, локальные возмущения различных параметров среды на расстояниях до  $r \sim \exp M$  (км) от будущих эпицентров, а также активизация дегазации водорода [Войтов, 2002; Firstov, Shirokov, 2005]. Поперечные размеры зоны локальных возмущений по “среднесрочным признакам” достигали 2–3 тысяч километров [Соболев, 1993; Добровольский, 1984]. Но эта зона не является областью подготовки конкретного сильного землетрясения или конкретного крупномасштабного разрыва, это зона эндогенного возбуждения среды [Соболев, Пономарев, 2003; Любушин, 2011]. Также и наблюдаемые локальные возмущения среды не являются предвестниками конкретного сильного землетрясения, так как их положение относительно эпицентров будущих землетрясений случайно во времени и пространстве [Трапезников, 1993; Соболев, Пономарев, 2003].

Характерной особенностью сейсмотектонического процесса в предельно энергонасыщенной среде является его неустойчивость. Во-первых, постоянно изменяются физико-химические и физико-механические свойства элементов и параметров контактного взаимодействия в граничных структурах и внутри блоков за счет их взаимодействия с восходящими потоками легких газов. Во-вторых, на среду постоянно действуют флуктуационные и периодические возмущения, создавая в совокупности шумовое силовое поле (деформационные волны, включающие приливы, метеорологические факторы, упругие волны местной и отдаленной сейсмичности, вариации скорости вращения Земли, разномасштабные вариации объема элементов среды и др.). Поэтому среда, и прежде всего граничные структуры, всегда находится на грани разрушения или в процессе разрушения. Эти условия могут предопределять вероятностный характер типа релаксации напряжений – крип, рой небольших разрывов или крупномасштабный разрыв.

Следовательно, в реальной пространственно связанной блочной структуре платформ очевидна неопределенность разблокировки конкретной граничной структуры, так же как и время ожидания этого процес-

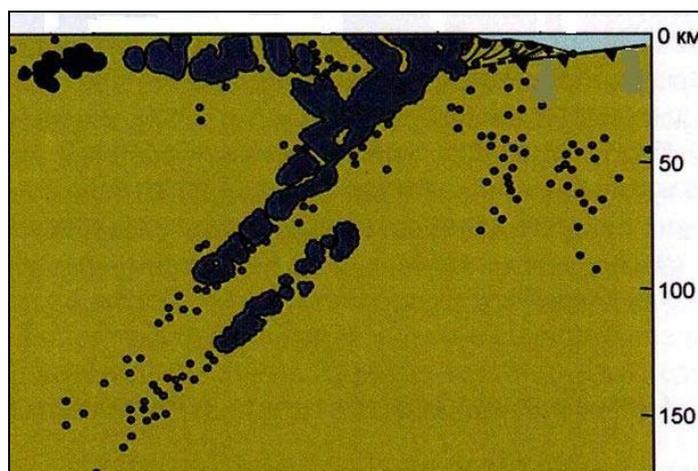


**Рис. 13.** Сейсмотектонические режимы блоковой среды плитных зон: *a* – фоновый, *b* – подготовки очагов сильных коровых землетрясений в регионе. 1 – блоки; 2 – границы, по которым происходит движение блоков; 3 – заблокированные границы блоков; 4 – фоновые потоки легких газов; 5 – импульсные потоки легких газов в региональном масштабе; 6 – область структурно-вещественных преобразований (верхняя мантия – средняя кора). М – граница Мохоровичича. Очевидна неопределенность разблокировки какой-либо граничной структуры, соответственно и времени этой разблокировки.

**Fig. 13.** Seismotectonic regimes of block medium of plate zones: *a* – background regime; *b* – preparation of foci of strong regional earthquakes in the crust. 1 – blocks; 2 – boundaries along which blocks move; 3 – blocked boundaries of blocks; 4 – background streams of light gases; 5 – impulse streams of light gases in the regional scale; 6 – domain of structural and compositional transformations (upper mantle – middle crust). М – Mohorovichich boundary. It is evident that release of any boundary structure is uncertain, and release timelines are thus uncertain too.

са (рис. 13). Следует иметь в виду, что реализуются два конкурирующих процесса: блокировка движения блоков за счет дегазации и движения блоков, препятствующие их блокировке, причем интенсивность этих процессов может различаться в различных областях региональной зоны. Здесь объясняется повторяемость крупномасштабных разрывов в одних и тех же граничных структурах и широкий диапазон сейсмической энергии КР.

Естественно возникает вопрос об условиях подготовки крупномасштабных (протяженностью в сотни километров) структур разрушения в зонах субдукции (рис. 14). Структурно зона субдукции представляет разрушенную сейсмичностью различного ранга фокальную зону: уходящий от поверхности разрушенный внешний слой субдуцирующей плиты, саму субдуцирующую плиту и внутренний «разрушенный» слой, начиная, примерно, с глубин 100 км. Чувствительные для нас сильнейшие землетрясения происходят в поверхностной, уже разрушенной, зоне на глубинах до 30–50 км, причем эта зона находится от станций мониторинга на расстояниях до 150–200 км, т.е. природой



**Рис. 14.** Структура зоны субдукции с непрерывной и долговременной сейсмичностью различного ранга (В.Л. Ломтев, В.Н. Патрикеев, И.Н. Тихонов). Темные пятна – сейсмические разрывы. Мониторинг параметров среды ведется в разрушенной зоне, поэтому фокальная зона слабо контролируется.

**Fig. 14.** Deformation structure of subduction zones characterized by continuous and long-term seismicity of various ranks (according V.L. Lomtev, V.N. Patrikeev, and I.N. Tikhonov). Dark spots – seismic fractures. Parameters of the medium are monitored in the disturbed zone; therefore, the focal zone is poorly recorded.

созданы уникальные возможности для непрерывного и долговременного мониторинга этой зоны и пространственного контроля сейсмической опасности. Однако локальный геофизический и гидрогеохимический мониторинг по десяткам станций контроля на побережье не позволяет диагностировать формирование в разрушенной среде крупномасштабных структур разрушения и процесс подготовки их распада. Фактически станции мониторинга не контролируют состояние фокальной зоны. Между станциями мониторинга и положением реального КР находится раздробленная и разрушенная структура, демпфирующая между ними силовое взаимодействие. Сейсмотектоническая и динамическая ситуация в разрушенной фокальной области зоны субдукции существенно отличается от ситуаций в граничных структурах блоковой системы платформ. Она более неопределенная и быстро изменчива. Блокировка крупномасштабного движения плит через раздробленную контактную зону, скорее всего, невозможна. Можно полагать с большой долей вероятности, что возможна только блокировка перемещения различных ансамблей отдельных частей в раздробленной среде, контролирующей слабые и средние по силе сейсмические события. Учитывая данные [Boldyrev, 2002], природу процессов блокировки в зоне субдукции необходимо обсуждать дополнительно.

Поэтому будем рассматривать развитие аналогов крупномасштабных разрывов, а именно, быстрых подвижек вдоль граничных структур плит и межблоковых

структур, связанных, как отмечено выше, с резким уменьшением коэффициента трения [Ребецкий, 2006, 2009]. При анализе азимутальных годографов очаговых волн было показано, что эти волны формируются последовательными «разрывами» с возрастающими по времени интенсивностями [Горбунова, 1983; Шаров, 1992]. Формирование таких разрывов может быть связано с последовательным «вспарыванием» локализованных областей блокировки (зон уплотнения в терминологии [Ребецкий, 2006, 2009]) вдоль граничных структур. Начало «вспарывания» одной из областей может быть инициировано быстрым стоком легких газов из зон деструкции блоковых структур и/или зоны субдукции в будущую крупномасштабную структуру разрушения и последующим разуплотнением локализованных контактных областей блокировки. Можно полагать, что время этого разуплотнения является скрытым параметром. Оценка времени такого разуплотнения и его масштабы, так же как и контроль этого процесса, представляют интерес для краткосрочного прогноза. Очевидно, что время такого разуплотнения граничных структур ограничено действием триггерных эффектов.

## 7. О ПРОГНОЗЕ СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сейчас для многих очевидно, что сильные землетрясения происходят в период эндогенного возбуждения большой территории сейсмоактивного региона при весьма небольших вариациях параметров среды [Добровольский, 1984; Соболев, 1993; Гольдин, 2002; Гуфельд, 2007]. Эта территория по данным сейсмологического и гидрогеохимического мониторинга выделяется достаточно надежно и для нее осуществляются эмпирические среднесрочные прогнозы сейсмической опасности. Как показывает опыт наблюдений, появление таких признаков не означает неотвратимости сильных сейсмических событий [Соболев, 1993]. Этот опыт должен использоваться. Однако прогноз положения эпицентральной зоны сделать не удастся. Наблюдаемые локальные возмущения различных параметров среды не связаны с последующим сильным землетрясением. Об этом говорит весь опыт наблюдений. Действительно, эти возмущения весьма странные. Они наблюдаются на значительном расстоянии от граничной (разрывной, т.е. несплошной) структуры, где происходит КР. Между зоной возмущения параметра и эпицентральной зоной находятся другие граничные структуры, вдоль которых ничего не происходит, локальные возмущения не чувствительны к акту землетрясения. Совершенно не объяснимы были ситуации, при которых локальные или интегральные возмущения параметров среды закончились, а КР происходит в этой зоне или вблизи ее границ через год–два. Уже эти наблюдения показывают, что процессы подготовки разрушения монолитных образцов и КР в геологиче-

ской среде настолько различны, что строить стратегию прогноза КР с учетом лабораторного моделирования не приемлемо. Поэтому нельзя было исключать того, что дать одновременно краткосрочный прогноз места и времени разблокировки определенной граничной структуры будет вообще нельзя. Рассмотренная в работах [Гуфельд, 2007; Gufeld, 2008] модель сейсмического процесса и сильных землетрясений как его составной части позволяет объяснить причины неудач в прогнозировании сильных землетрясений. Эти причины связываются не с пропусками возмущений каких-либо полей, а с неадекватным пониманием сейсмотектонических ситуаций (см. рис. 13).

Целью прогнозного мониторинга всегда были поиски локальных и площадных локальных аномалий различных полей, однако в этих зонах сильные события не происходили. Сейчас понятно, что эти аномалии отражали пространственную эндогенную активизацию и не могли быть предвестниками конкретных землетрясений. Поэтому только увеличение плотности сети мониторинга не могло быть оправданным. Например, высокая плотность сетей мониторинга сигналов системы GPS в Японии или США не принесла ничего нового. Искать и выделять в региональной блоковой структуре в этот период потенциально опасные граничные структуры, динамическое поведение которых ранее не было понято и не фиксировалось. Ведь блокировка движения блоков в региональном масштабе означала, что потенциально опасные очаги, т.е. связанные состояния многих блоков, уже образовались. Фактически первой задачей является констатация факта регионального возбуждения среды, прежде всего по параметрам сейсмического поля («кольцевая» сейсмичность, сейсмическое затишье) и динамическим параметрам среды. Аномалии локальных полей также необходимо привлекать, учитывая, что они чаще всего будут кратковременными. Региональное возбуждение имеет длительный период. Этот период по многим оценкам может проявляться от месяцев до нескольких лет, причем КР может произойти в любой момент, т.к. среда находится в неустойчивом состоянии. Влиять на развитие ситуации могут также отмеченные выше фоновые силовые поля. Но более сильное триггерное действие оказывает колебательный режим блоковой структуры [Gufeld et al., 2010]. Учитывая собственную активность среды и ее нестабильность, можно считать, что реализация крупномасштабных разрывов связана с действием триггерных процессов [Садовский и др., 1987; Гусев, Гуфельд, 2006; Соболев, 2010; Шерман, 2009; Sherman et al., 2011], как по конкретному месту, так и во времени. Мониторинг краткосрочных признаков КР приобретает особую значимость, его необходимо вести непрерывно, особенно в зонах мегаполисов и важных объектов инфраструктуры. Необходимо искать также признаки, указывающие на наиболее вероятное проявление акта разблокировки блоковой структуры крупно-

масштабным разрывом, роем слабых землетрясений или крипом. Здесь у нас одни проблемы. Возникает вопрос, о каких краткосрочных признаках может идти речь?

Поверхностный слой практически не нагружен и на него в большей степени действуют слабые силы фоновых источников. В том же слое происходит разгрузка природных газов из более глубоких областей. Измерения носили локализованный характер в поверхностном слое коры. Процессы в поверхностных слоях коры, мониторинг которых реально осуществляется с целью поиска предвестников, могут отражать явления в области очага с некоторым запаздыванием, учитывая вертикальные процессы переноса энергии, или вообще не отражать их. Многолетний мониторинг показал, что реально не удалось обнаружить краткосрочные признаки – предвестники сильных землетрясений в литосфере, связанные с прогнозируемым местом его проявления. Кандидатами на это были вариации естественного электромагнитного поля (за счет механоэлектрических преобразований [*Электромагнитные предвестники...*, 1982; *Гохберг и др.*, 1988] и процессов декомпрессии), электрического поля Земли [*Руленко, 2000*] и радона [*Уткин, Юрков, 2007*], геомагнитного и электротеллурического полей [*Соболев, 1993*], деформаций земной коры [*Соболев, 1993; Соболев, Пономарев, 2003; Gol'din et al.*, 2001], причем эти параметры, за исключением деформации земной коры, не проходили главного теста. В акте землетрясения, даже в том случае, если датчики находились в эпицентральной зоне, возмущений не наблюдалось. Активизацию локального выхода радона перед землетрясениями наблюдали многие, но эти данные не дают информации о протекающих процессах и публичных прогнозов по этому методу практически не делалось. Измеряемые локальные аномалии радона также не совпадали с будущим КР. То же касается мониторинга волноводного распространения естественных электромагнитных полей (атмосфериков) [*Поиск...*, 1987; *Гуфельд, 1995*]. В этом мониторинге практически было впервые показано существование литосферно-атмосферных и литосферно-ионосферных (имеется в виду только волновод Земля – ионосфера) связей, но не ионосферных возмущений в связи с сейсмическим процессом. Отличительной особенностью этого мониторинга был анализ интегральных параметров распространения естественных или искусственных электромагнитных полей в волноводе Земля – ионосфера, контролирующей зону, существенно превышающую размеры эпицентральных. Развитием этого направления являются работы по трассовому анализу параметров волноводного распространения сверхдлинных волн (СДВ мониторинг), источниками которых являлись передатчики фазовой радионавигационной системы «Омега» [*Gufeld, 1992; Гуфельд, 1995*]. Анализировались данные на более чем 500 землетрясений с  $M=5-7.2$  в различных сейсмоактивных зонах, статистически был определен период

краткосрочной сейсмической опасности – около 25 суток. Далее вдоль двух различных трасс Реюньон – Москва и Либерия – Москва осуществлен краткосрочный прогноз времени сильных землетрясений с  $M>6$ : четыре правильных прогноза, один – ложный, пропусков событий в период мониторинга не было. Метод позволял контролировать региональную зону. Анализируя прохождение по трассе первой, второй и третьей моды, можно было сделать вывод, что зона возмущений волновода смещалась на 500–1000 км вдоль трассы в период за 5–7 суток до события. Положение реальной эпицентральной зоны формируется, по-видимому, в самый последний момент, т.е. в течение последних нескольких суток перед событиями. Природа этих аномалий связывается с изменением проводимости приземной атмосферы за счет дегазации, причем землетрясения по времени также не совпадали с аномалиями волнового поля (!). Здесь также очевидны проблемы с краткосрочным прогнозом эпицентральной зоны.

При исследованиях Земли с космических аппаратов обнаружены стационарные и нестационарные аномалии уходящего инфракрасного излучения (ИК). Контраст между аномальными и фоновыми участками достигал 3–4 °К. Площадь проявления аномалий достигала нескольких десятков тысяч квадратных километров, а время – от нескольких суток до месяца. Однако нестационарные аномалии наблюдались на разломах и их пересечениях непосредственно перед сильными землетрясениями и были удалены от будущих эпицентров на сотни, иногда тысячу километров. Тепловые аномалии как бы оконтуривали региональную зону, в которой в последующем происходило сильное сейсмическое событие [*Горный и др.*, 1988]. Природу тепловых аномалий объясняют выбросом в приземную атмосферу углекислого газа и метана, вызывающих парниковый эффект, т.е. процессами разгрузки среды природными газами. Следствием дегазации являются фиксируемые проявления линейных облачных структур над разломами перед сильными землетрясениями [*Горный и др.*, 1988; *Морозова, 2005; Tronin et al.*, 2002; *Pulinets, Boyarchuk, 2004; Doda et al.*, 2011]. Выбросам газов в приземную атмосферу, включая радон, способствуют эффекты декомпрессии, контролирующие уровень микросейсмического шума. Аномалиям микросейсмического шума сопутствует увеличение проводимости приземной атмосферы [*Шулейкин, Поликарпов, 1991*].

Таким образом, процессы дегазации контрастно проявляются на заключительной стадии подготовки КР в особенностях динамического поведения среды и разгрузке природных газов на границе литосфера – атмосфера и вызывают аномальный ход различных полей, отмеченных выше. Возможен ли краткосрочный прогноз эпицентральной зоны сильного землетрясения и его времени? Если говорить о времени, то, по-видимому, ответ утвердительный. Обобщение данных

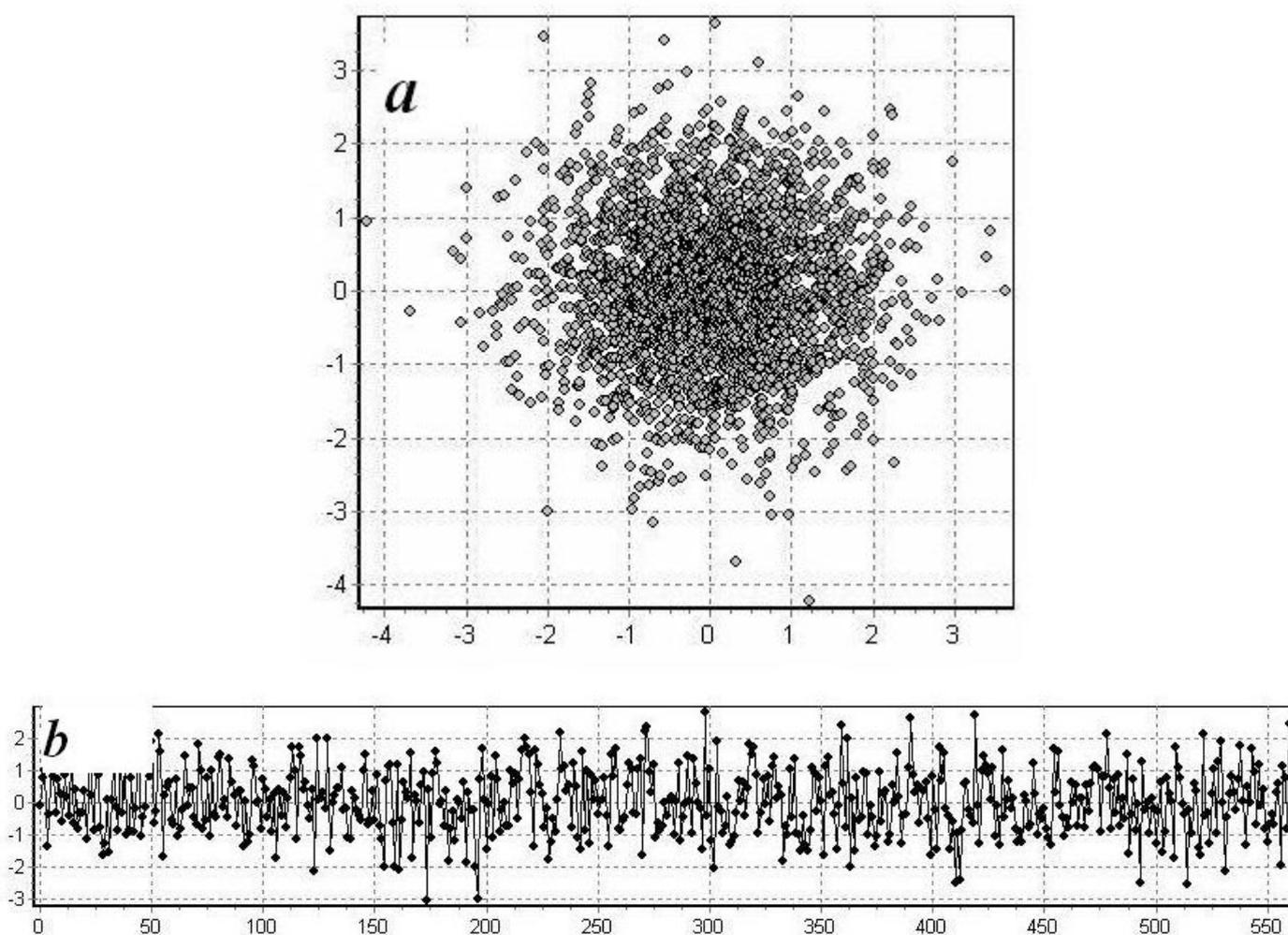
наблюдений указывает на возможный период, уже контролируемый (например [Гуфельд, 1995]), краткосрочной сейсмической опасности до семи суток для зоны регионального масштаба. Однако эти подходы относятся только к платформенным областям. Для таких сейсмоактивных зон, как Камчатка, Курилы, Япония и др., ситуация значительно более сложная и наблюдательный опыт практически отсутствует. Нужно учитывать также то, что все аномалии не имеют «визитной карточки», поэтому в прогнозах необходимо сочетать эмпирический опыт и наблюдения, включающие данные мониторинга, физические основы которых могут быть понятны. Прогноз краткосрочного периода сейсмической опасности нужно давать совместно с прогнозом эпицентральной зоны или конкретных граничных структур. Наиболее перспективными для отработки методологии краткосрочного прогноза периода сейсмической опасности являются методы спутникового мониторинга уходящего ИК излучения. В настоящее время контроль каждой зоны происходит одноразово в течение 10–15 минут в сутки (один пролетный аппарат), а необходим непрерывный и долговременный мониторинг и использование дистанционных инструментальных средств мониторинга приземной атмосферы. Преимуществом спутниковых методов является возможность одновременно «видеть» весь регион, что особенно необходимо в работах по зонам субдукции, непосредственный мониторинг которых исключен. Свечение отдельных границ в ИК-излучении указывает на активизацию сброса энергии средой из поверхностных слоев. Другие границы в данный пролет не «светятся», они не «активизированы», т.е. устойчивы (блокированы) в данный краткосрочный период. Но именно по ним могут произойти в ближайшие несколько суток сильные сейсмические события (такая ситуация была характерна также для аномалий другой природы, например [Трапезников, 1993; Соболев, Пономарев, 2003]). Сильные сейсмические события не обусловлены непосредственно процессами в зонах возмущений или активизации и не связаны с ними. По представленным наблюдениям период «свечения» границ не превышает одного часа. При непрерывном наблюдении ИК излучения в регионе можно ожидать более ясной ситуации со «свечением» границ КР и как минимум выделения потенциально опасных зон или граничных структур. Однако краткосрочный прогноз места и времени сильных землетрясений по вариациям параметров ионосферной плазмы сейчас представляется наивным (краткий обзор с физической постановкой задач [Бучаченко и др., 1996]). За тридцать лет спутникового мониторинга ионосферной плазмы не обнаружено аномалий, которые можно было бы относить к предвестникам (ситуация аналогична результатам поиска литосферных предвестников). В то же время поиск литосферных предвестников привел к разработке новой модели среды [Садовский и др., 1987], пониманию причин ее неста-

бильности и разномасштабных вариаций параметров. Прорыва же в понимании природы ионосферных возмущений в связи с сейсмичностью не достигнуто, поэтому интерес представляют только непрерывный спутниковый мониторинг ИК излучения поверхности и различных параметров приземной атмосферы.

В рамках лабораторных моделей краткосрочными признаками можно было считать также форшоковую активизацию, однако она наблюдалась редко и не всегда в зоне будущего КР. Удивительно, но пока отсутствуют подходы к прогнозу эпицентральной зоны или конкретной граничной структуры сильнейших землетрясений на основе анализа режима слабой сейсмичности. Одной из причин этого является использование статистических методов и поисков похожести сценариев развития процессов без учета реалий среды и процессов, поддерживающих ее деструкцию и расслоенность (сейсмическая мутность среды [Николаев, 1972]). В то же время очевидно, что слабая сейсмичность несет прямую информацию о процессах в среде, но сейчас мы не понимаем, при каких условиях слабая сейсмичность вызывает или не вызывает разгрузку среды.

Для повышения достоверности краткосрочного прогноза эпицентральной зоны интересны работы по сопоставлению спутникового мониторинга с данными динамических параметров колебательного режима ОНС среды [Gufeld et al., 2010] и режима слабой и, возможно, средней сейсмичности, включая их миграцию, причем понимание природы миграции слабых землетрясений является ключевым в анализе сейсмического процесса. В рамках изложенных представлений «латеральная миграция» слабых землетрясений таковой не является. Кажущуюся горизонтальную миграцию слабых землетрясений объективно лучше объяснить особенностями пространственной дегазации. Сейчас эти работы требуют специальных исследований. Другая проблема заключается в мониторинге разномасштабных зон сейсмоактивного региона, позволяющем во времени следить за продолжительностью и сменой устойчивых ↔ неустойчивых состояний блоковой среды и граничных структур. Представляют интерес количественные исследования процессов накачки среды энергией восходящих потоков легких газов на основе анализа коэффициентов уравнения (1). Здесь также необходимо будет учитывать дегазацию из зон деструкции (зоны барьерного эффекта) в толщу блоков и в граничные структуры. Эти геологические факторы ранее не учитывались. Для этих целей недостаточно использование естественных источников упругих волн, необходимо повышение точности измерения отношения  $V_p/V_s$  за счет развертывания сети искусственных источников – вибраторов. Такие системы мониторинга необходимо в первую очередь создавать для защиты населения крупнейших городов и ряда промышленных объектов.

В последние годы получили развитие некоторые



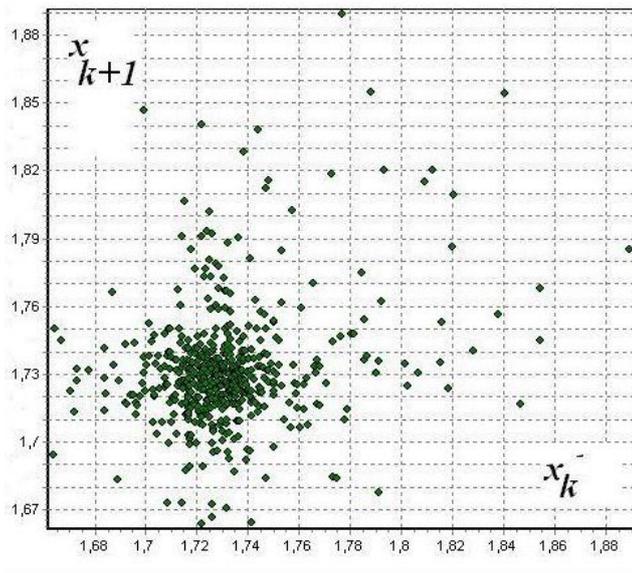
**Рис. 15.** Диаграмма Пуанкаре (a) для временной шумовой последовательности измеряемых величин (b). Отсутствие информации – белый гауссов шум с  $m_x=0$ ,  $D_x=1$ .

**Fig. 15.** Poincaré diagram (a) of time sequence of noise values (b). No information – white Gaussian noise ( $m_x=0$ ;  $D_x=1$ ).

электромагнитные методы мониторинга блоковых структур. Метод основан на регистрации магнитных флуктуаций как минимум в двух точках на расстоянии, меньшем 100 км от разломной структуры. Природа возмущений, наиболее вероятно, связана с быстрым смещением блоков с разной проводимостью относительно друг друга и сопровождающей этот процесс электризацией при образовании микротрещин. Результаты исследований обнадеживают. Возмущения наблюдались в пределах нескольких суток до, в акте события (метод проходит основной тест на чувствительность) и после его окончания. Причем возмущения отражают подвижки вдоль разлома [Корепанов, Дудкин, 2010], что укладывается в рамки физических представлений процессов разрушения.

Несколько отдельно стоит проблема среднесрочного прогноза эпицентральной зоны и магнитуды веро-

ятого сейсмического события в зонах субдукции. Укажем лишь на одну из самых последних работ [Kopnichev et al., 2011], в которой обсуждается ситуация перед Великим японским землетрясением. Здесь рассматриваются кольцевые (точнее эллипсоидальные с большой осью до 100–170 км) структуры сейсмичности в диапазоне глубин 0–33 и 34–70 км, формирующиеся соответственно от 17 до 34 и от 18 до 35 лет. Сильнейшие сейсмические события происходят после завершения формирования кольцевых структур (среднесрочный период ожидания), а их эпицентры фиксируются вблизи области пересечения или касания кольцевых структур. Магнитуда будущего события оценивалась с учетом событий с пороговым уровнем магнитуды. Статистика таких наблюдений большая. Отметим, формирование кольцевых структур связывается с подъемом «флюидов» из мантии в верхние горизонты



**Рис. 16.** Диаграмма Пуанкаре реальной последовательности измерений параметра  $x$ , отражающего отношение скоростей продольной и поперечной волн. Обращает на себя внимание «крабовое» распределение точек относительно центральной шумовой области.

**Fig. 16.** Poincaré diagram for the actual sequence of parameter  $x$ , showing the ratio of velocities of longitudinal and transverse waves. The «crab-shape» distribution of points against the central noise area is of interest.

коры. Ранее мы отметили, что таким «флюидом» могут быть только легкие газы.

Таким образом, в настоящее время уже просматриваются ряд методов, которые можно рекомендовать для постановки режимного мониторинга, причем эти же методы будут оказывать поддержку исследованиям процессов развития кризисных ситуаций.

Однако всегда стоял и стоит вопрос о том, являются ли выбранные параметры системы информативными, отражают ли они изменение состояния системы, связанное с развитием кризисных ситуаций. Понятно, что если выбранный для измерения параметр объекта является информативным, то он обязательно несёт в себе закономерность функционирования объекта.

Критерием наличия закономерности является отличие последовательности измерений от «чистого» шума. «Чистый», т.е. неинформативный, шум – это случайный процесс, обладающий максимальной энтропией (неопределенностью). В классах вероятностных распределений с ограниченной дисперсией, к которым относятся все физически реализуемые процессы, таким является белый гауссов шум. Сделаем оценку информативности параметров системы с использованием диаграммы Пуанкаре. Диаграмма Пуанкаре белого гауссова шума с математическим ожиданием  $m_x=0$  и дисперсией  $D_x=1$  показана на рис. 15.

Диаграмма Пуанкаре представляет собой точечное

графическое отображение  $N$  значений последовательности  $x_k$  при  $k=1, 2, \dots, N$  на двумерном поле, в котором ординатой точки является значение  $x_{k+1}$ , а абсциссой – предшествующее значение  $x_k$ . Нанося поочередно точки для  $k=1, 2, \dots, N$  на график, получаем точечное множество, образующее фигуру, по виду которой можно судить о типе последовательности, а отсюда и о состоянии объекта – источнике этой последовательности.

Если диаграмма Пуанкаре измеренных значений параметра объекта отличается по виду от рис.15, то она отражает наличие закономерности в последовательности значений измеряемого параметра, а значит и в источнике этой последовательности – объекте. Эти идеи были проверены на параметре  $x$ , отражающем отношение скоростей  $V_p/V_s$  продольной и поперечной волн.

На рис. 16 представлена диаграмма Пуанкаре последовательности измерений этого параметра, зарегистрированной станцией RUS в азимутальном направлении  $90\text{--}200^\circ$  в период с 01.03. по 31.03.2003 г. на дальности контроля землетрясений менее 300 км. Зарегистрировано 495 землетрясений с магнитудой менее 6, каждому из которых соответствует одно значение параметра, отображённое на диаграмме точкой с ординатой  $x_{k+1}$  и абсциссой  $x_k$ .

Детальный статистический анализ последовательности измерений этого параметра дал следующие результаты. Оказалось, что оценка математического ожидания измеряемого параметра остаётся константой на протяжении рассмотренных нескольких лет для всех станций и равна  $m_x=1.732\pm 0.005$ . Коэффициент корреляции последовательных измерений мал (находится в пределах  $0.2\text{--}0.3$ ). Это означает их линейную независимость, что подтверждает высокую собственную информативность каждого из них. Следовательно, связь между ними, которая одновременно является характеристикой продуцирующей среды, может быть только нелинейной. Именно поэтому она была выражена нелинейным уравнением эволюции состояния среды (уравнение 1).

Оценки плотности распределения вероятностей значений измеряемого параметра показали, что она является негауссовой, односторонней ( $x>0$ ), асимметричной, одномодальной, с модой  $1.720\pm 0.005$  (значением  $x$ , при котором достигается максимум), меньшей, но близкой к  $m_x$ . Плотность распределения имеет «хвост», быстро убывающий с увеличением  $x$ , по форме похожа на логнормальное распределение, но приближается к причинному (дельта-функции), поскольку среднеквадратичное рассеяние  $\sigma_x$  значений измеряемого параметра относительно математического ожидания очень мало ( $\sigma_x/m_x\sim 0.02$ ). Очевидное отличие диаграммы на рис. 16 от представленной на рис. 15 свидетельствует об информативности параметра отношения скоростей сейсмических волн и наличии закономерности, которую он отражает. Этот параметр не

случаен.

Таким образом, необходимы специальные исследования информативности выбираемых для мониторинга сейсмической опасности параметров, конечной целью которых будет переход от эмпирических методов оценки сейсмотектонических ситуаций к контролируемым параметрам состояния среды.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема прогноза сильных коровых землетрясений далека от решения. Однако понимание особенностей строения среды и движущих сил сейсмического процесса дает основание для постановки новых работ и продолжения осмысления накопленного опыта. Представленные результаты исследований деструкции горных материалов в результате взаимодействия с легкими газами, как и данные многолетнего мониторинга геологической среды, а также оценки ее реологических параметров показывают, что мы имеем дело с энергоактивной средой, свойства и особенности динамики которой в параметрах различного мониторинга мы ранее не учитывали [Садовский и др., 1987; Гуфельд, 2007; Пономарев, 2008]. Энергоактивность геологической среды контрастно проявляется в разномасштабных и непрерывных вариациях объемно-напряженного состояния. Особенно это касается зон субдукции. Для постановки мониторинга сильных землетрясений весьма важными являются понимание процессов разгрузки среды природными газами и переноса энергии восходящими потоками легких газов с глубин 30–20 км на уровень 10–5 км и далее из поверхностных слоев в атмосферу. По-видимому, особое внимание придется уделить изучению процессов разуплотнения граничных структур за счет имплантации в них легких газов при реальных P–T условиях. При этом сложности в реализации прогноза увеличиваются. Быстрая изменчивость параметров среды может коренным образом менять геотектонические ситуации от фоновых до критических и наоборот [Гусев, Гуфельд, 2006; Gufeld et al., 2011]. И нужно по данным неопределенного мониторинга в поверхностных слоях коры и приповерхностной атмосфере, а также динамических параметров среды учиться понимать эти ситуации. Трудности усугубляются тем, что в один среднесрочный период реально возможны КР в нескольких граничных структурах, разнесенных на сотни километров, в том числе в зонах субдукции. Иллюстрацией этого является среднесрочная оценка сейсмической опасности для большей части территории Японии, сделанная в работе [Любушин, 2010] по параметрам микросейсмического шума (возбужденного за счет разгрузки природных газов [Осика, 1981; Войтов и др., 1994; Gufeld et al., 2010]) в преддверии Великого Японского землетрясения 11 марта 2011 г. Это предопределяет для их мониторинга преимущественное использование интеграль-

ных и пространственных методов, основными из которых могут быть сейсмический и космический мониторинг. Однако нельзя исключать того, что реализовать краткосрочный прогноз эпицентральной зоны вообще не удастся с необходимой точностью. Тогда на повестку дня может стать вопрос о предотвращении КР как минимум в зонах защищаемых объектов. Основанием для этого являются те же особенности сейсмического процесса, о которых выше шла речь. Оптимизм здесь связан с высокой чувствительностью пространственно-связанных блочных структур к внешним воздействиям, причем речь не идет о снятии литостатических напряжений, это в принципе невозможно. Задачей будет поддержание режима движения блоков и предотвращение их блокировки. Это можно достичь при длительном воздействии на граничные структуры излучения мощных вибраторов [Садовский и др., 1987, Садовский, Писаренко, 1991; Гуфельд, 2007], упругие поля которых, так же как и некоторых естественных полей (микросейсм, лунные приливы, скачки атмосферного давления), оказывают влияние на динамику восходящих потоков легких газов, ускоряя и активизируя процессы аккомодации элементов в межблоковых структурах. Однако простых решений для регулирования ОНС геологической среды [Тарасов и др., 1999; Astafurov et al., 2008], не учитывающих релаксирующее действие естественных фоновых силовых полей и особенностей пространственного режима слабой сейсмичности, ожидать не следует. В зонах субдукции такая методология вообще исключена, поэтому для этих зон необходимо продолжить исследования сейсмотектонического процесса и прогноза сильнейших землетрясений, учитывая также особенности колебательно-го режима элементов среды, обусловленные дегазацией легких газов.

Несмотря на значительные успехи в изучении среды и движущих сил тектоногенеза, основные проблемы прогноза связаны с еще недостаточным пониманием процессов, контролирующих подготовку и протекание сейсмических явлений, и, самое главное, использованием неадекватных методов мониторинга энергоактивной геологической среды. Однако достижением следует считать уже доказанное отсутствие детерминированных связей в развитии кризисных сейсмотектонических ситуаций, обусловленных реально протекающими процессами. Именно это не позволяет разворачивать адекватную систему разномасштабного мониторинга на платформенных блоковых структурах. Для зон субдукции еще необходимо разработать принципы мониторинга фокальной области, включая спутниковый мониторинг. Общей проблемой для этих зон является идентификация разномасштабного состояния среды с непрерывно меняющимися параметрами, оценка ее устойчивости и близости к критическим условиям на основе уравнений эволюции (уравнения типа (1)), с учетом при этом непрерывно поступающей информации о состоянии среды. Оче-

видна также необходимость комплексного мониторинга, количественная достаточность параметров которого может быть аргументирована на основе представлений физики сейсмического процесса.

Требуется специального анализа проблема краткосрочного периода сейсмической опасности. Среднесрочный период сейсмической опасности для катастрофических землетрясений уровня 11 марта 2011 г. в Японии, который был дан в работе [Любушин, 2011], не был ограничен конкретной датой, этот период был растянут на более чем первые месяцы. Естественно об объявлении тревоги и принятии оперативных мер защиты не могло быть и речи. Однако ряд выполненных работ позволяют говорить о возможности существенного сокращения краткосрочного периода сейсмической опасности (например [Дода и др., 2011]). Мы же представим результаты СДВ мониторинга, описанного выше. Ретроспективный анализ показал, что для региональной зоны можно было указать время события с точностью до суток [Gufeld et al., 1994]. Этот анализ был осуществлен для ряда сильных событий, в том числе Спитакского ( $M=7.2$ ), Рудбарского ( $M=7.5$ ) и Рачинского ( $M=7.1$ ) землетрясений, причем ретроспективно конкретные сутки вероятного сейсмического события можно было указать за 3–5 суток. Такой прогнозный интервал сейсмической опасности вполне приемлем. Но это были, также как и данные по облачным структурам и уходящему ИК излучению, не прямые, а косвенные оценки геоситуаций по параметрам атмосферы, а не земной коры. Однако сейчас могут быть использованы для этих же целей также другие методы, контролируемые разномасштабный колебательный режим блоковой земной коры, с возможной перспективой поиска скрытых формирований крупномасштабных структур разрушения.

## 9. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне признательны за постоянную поддержку В.Н. Страхову и А.В. Николаеву, за внимание и стимулирование дискуссий по проблеме – Д.Н. Дмитриевскому, Г.А. Соболеву, Ю.Л. Ребецкому, А.М. Кузину, за разработку алгоритмов расчетов – А.В. Афанасьеву и В.В. Афанасьевой. Авторы благодарны С.И. Шерману, предложившему представить эту работу в журнал «Геодинамика и тектонофизика».

## 10. ЛИТЕРАТУРА

- Адушкин В.В., Ан В.А., Гамбурцева Н.Г., Дараган С.Н., Люкэ Е.И., Овчинников В.Н. Сейсмический мониторинг литосферы при помощи ядерных взрывов // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Научный мир, 1998. Т. 2. С. 145–150.
- Азбель И.Я., Толстихин И.Н. Радиогенные изотопы и эволюция мантии Земли, коры и атмосферы. Апатиты: Наука, 1988. 140 с.
- Айтматов И.Т. Роль остаточных напряжений в горных породах в формировании очагов горных ударов и техногенных землетрясений // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. Москва – Бишкек: Изд-во Printhouse, 2003. С. 209–221.
- Ан В.А., Люкэ Е.И. Циклические изменения параметров сейсмической волны Р на трассе Невада-Боровое // Физика Земли. 1992. № 4. С. 20–31.
- Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. 672 с.
- Балакина Л.М. Субдукция и механика очагов землетрясений // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 120–141.
- Белоусов В.В. Тектоносфера Земли: взаимодействие верхней мантии и коры. М.: МГК, 1981. 71 с.
- Бучаченко А.Л., Оравский В.Н., Похотелов О.А., Сорокин В.Н., Страхов В.Н., Чмырев В.М. Ионосферные предвестники землетрясений // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 9. С. 1023–1029.
- Вартамян Г.С., Гарифулин В.А., Шалина Т.Е., Шарпанов Н.Н. Гидрогеодеформационное поле в период Спитакского землетрясения // Советская геология. 1990. № 1. С. 92–95.
- Вертикальная аккреция земной коры: факторы и механизмы. Под ред. М.Г. Леонова. М.: Наука, 2002. 462 с.
- Войтов Г.И. Химизм и масштабы современного потока природных газов в различных геоструктурах Земли // Журнал Всесоюзного химического общества. 1986. Т. 31. № 5. С. 533–540.
- Войтов Г.И., Добровольский И.П. Химические и изотопно-углеродные нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных регионах // Физика Земли. 1994. № 3. С. 20–31.
- Войтов Г.И. К проблемам водородного дыхания Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. М.: ГЕОС, 2002. С. 24–30.
- Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52–67.
- Гамбурцев Г.А. Избранные труды. М.: АН СССР, 1960. 461 с.
- Гамбурцева Н.Г., Люкэ Е.И., Орешин С.И., Пасечник И.П., Рубинштейн Х.Д. Периодические вариации динамических параметров сейсмических волн при просвечивании литосферы мощными взрывами // Доклады АН СССР. 1982. Т. 266. № 6. С. 1349–1353.
- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. № 5. С. 5–22.
- Горбунова И.В. Об интерпретации сейсмических волн Р и S от землетрясений. Результаты исследований по международным геофизическим проектам // Интерпретация сейсмических наблюдений. М.: Наука, 1983. С. 88–102.
- Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // Доклады АН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 67–69.
- Гохберг М.Б., Морзунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмoeлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 178 с.
- Гусев Г.А., Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс в предельно энергонасыщенной геологической среде и прогноз землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 71–78.
- Гуфельд И.Л., Добровольский И.Л. Модель подготовки коровых землетрясений // Доклады АН СССР. 1981. Т. 260. № 1. С. 51–55.
- Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Лютиков Р.А., Савин В.И. Газы радиогенной природы в динамике литосферы // Доклады АН. 1993. Т. 328. № 1. С. 39–42.
- Гуфельд И.Л. Радиоволновые предвестники коровых землетрясений: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 1995. 27 с.
- Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Матвеева М.И. Метастабильность лито-

- сферы как проявление восходящей диффузии легких газов // Доклады АН. 1998. Т. 362. № 5. С. 677–680.
- Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМаш. 2007. 160с.
- Динамические процессы в геофизической среде. Под ред. А.В. Николаева. М.: Наука, 1994. 255 с.
- Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценках размеров зон проявления предвестников землетрясений // Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 7–44.
- Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: Наука, 1984. 190 с.
- Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ РАН, 1991. 219 с.
- Доброжиница Л.Ф. Деформации магматических пород в условиях глубинного тектогенеза. М.: Наука, 1988. 288 с.
- Дода Л.Н., Мартынов О.В., Пахомов Л.А., Натяганов В.Л., Стеманов И.В. Наземно-космический мониторинг и прогноз мегаземлетрясения в Японии 11 марта 2011 года // Наука и технологии в России. 2011. Т. 90. № 1. С. 35–44.
- Егорова М.О. Факторы повышенного риска развития атеросклероза // Клиническая лабораторная диагностика. 2002. № 6. С. 3–6.
- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясения. М.: Наука, 1980. С. 78–87.
- Захарова А.И., Рогожин Е.А. Глубокофокусные предвестники сильных сейсмических событий на Камчатке // Геофизика на рубеже веков. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 265–275.
- Зубков С.И. Времена возникновения предвестников землетрясений // Известия АН СССР. Физика Земли. 1987. № 5. С. 87–91.
- Киссин И.Г. Современный флюидный режим земной коры и геодинамические процессы // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 86–104.
- Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с.
- Козак А.Д., Новоселов О.Н. Асимптотическое поведение решений линейного однородного разностного уравнения второго порядка // Математические заметки. 1999. Т.66. Вып. 2. С. 211–215.
- Кольская сверхглубокая / Под ред. Е.А. Козловского. М.: Недра, 1984. 492 с.
- Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. М.: Металлургия, 1990. 216 с.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. О геодинамических процессах, связанных с парами сильных землетрясений в Центральной и Южной Азии // Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика. Алматы, 1997. С. 83–91.
- Корепанов В.Е., Дудкин Ф.Л. Сейсмомагнитные предвестники землетрясений // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2010. С. 377–382.
- Кузьмин Ю.О. Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов // Геологическое изучение и использование недр. № 4. М.: Геоинформмарк, 1996. С. 43–53.
- Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика асейсмичных разломных зон // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2002. № 1 (20). 27 с.
- Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: МГГУ, 2004. 280с.
- Левин Б.В., Чирков Е.Б. Особенности широтного распределения сейсмичности и вращения Земли // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 65–69.
- Леонов М.Г. Тектоническая подвижность фундамента и внутриплатформенный тектогенез в свете представлений о нелинейности геологических процессов // Нелинейная геодинамика. М.: Наука, 1994. С. 79–103.
- Летников Ф.А. Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении // Проблемы глобальной геодинамики. М.: ГЕОС, 2000. С. 204–225.
- Лук А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
- Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотному микросейсмическому шуму // Геофизические исследования и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С. 9–30.
- Мавлянов Г.А., Уломов В.И. Поиски предвестников землетрясений в Узбекистане // Поиск предвестников землетрясений. Ташкент: ФАН, 1976. С. 25–38.
- Маракушев А.А. Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М.: Наука, 1992. 208 с.
- Математическое моделирование сейсмического процесса ориентированного на проблему прогноза землетрясений. М.: МИТПРАН, 1993. 112 с.
- Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Моисеев Н.Н. Новые идеи для решения старой задачи: Прогнозирование сильных землетрясений (проект программы) // Вестник АН СССР. 1991. № 5. С. 41–56.
- Монахов Ф.И., Киссин И.Г. Новые данные по гидрогеодинамическим эффектам, предшествующим землетрясениям // Известия АН СССР. 1980. № 1. С. 105–107.
- Морозова И.М., Ашкенази Г.Ш. Миграция атомов редких газов в минералах. Л.: Наука, 1971. 121 с.
- Морозова Л.И. К вопросу об активности разломов, выявляемых в поле облачности на спутниковых снимках земли // Исследования Земли из космоса. 2005. № 2. С. 27–30.
- Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.
- Невский М.В. Сверхдлиннопериодные волны деформаций на границах литосферных плит // Динамические процессы в геофизической среде. М.: Наука, 1994. С. 40–54.
- Николаев А.В. Сейсмика неоднородных и мутных сред. М.: Наука, 1972. 175 с.
- Николаевский В.Н. Дилатансия и теория очага землетрясений // Успехи механики. 1980. Т. 3. № 1. С. 70–101.
- Николаевский В.Н. Земная кора, дилатансия и землетрясения // Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. С. 133–215.
- Новоселов О.Н. Идентификация и анализ динамических систем. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. 424 с.
- Новоселов О.Н. Идентификация состояния динамических объектов по измеряемым параметрам: от теории к практике // Измерительная техника. 2010а. № 2. С. 20–23.
- Океанизация Земли – альтернатива неомобилизму / Ред. В.В. Орленок. Калининград: КГУ, 2004. 267 с.
- Орленок В.В. Физика и динамика внешних геосфер. М.: Недра, 1985. 185 с.
- Осика Д.Г. Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука, 1981. 201с.
- Павленкова Н.И. Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества // Вестник ОГГГН РАН. 2001. № 4 (19). 18 с.
- Певнев А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений. М.: ГЕОС, 2003. 153 с.
- Писаренко В.Ф., Гамбурцев А.Г., Гамбурцева Н.Г. Малоизвестные работы и материалы из архива академика Г.А. Гамбурцева // Физика Земли. 2008. № 9. С. 71–80.
- Поиск электромагнитных предвестников землетрясения / Ред. М.Б. Гохберг. М.: Наука, 1987. 243 с.
- Поликарпова Л.А., Белавина Ю.Ф., Малиновский А.А., Поликарпов А.М. Временные закономерности распределения глубинных землетрясений земного шара за период 1963–1979 гг. // Физика Земли. 1995. № 2. С. 28–39.
- Пономарев В.С. Энергонасыщенность геологической среды. М.: Наука, 2008. (Труды ГИН РАН, Вып. 582). 379 с.
- Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф., Недядько В.В. Влияние катастрофических землетрясений на напряженное состояние среды удаленных территорий // Сборник трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. Тверь: Изд. ГЕРС, 2007. С. 200–204.
- Раутиан Т.Г. Сейсмоактивная среда и очаги землетрясений // Землетрясения и процессы их подготовки. М.: Наука, 1991.

- С. 35–48.
- Рац М.В., Чернышов С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.
- Ребецкий Ю.Л. Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегании // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 120–146.
- Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации остаточных напряжений и больших горизонтальных сжимающих напряжений в земной коре внутриплитовых областей // Проблемы тектонофизики. М.: Изд. ИФЗ РАН, 2008. С. 341–466.
- Ребецкий Ю.Л. Разлом – особое геологическое тело // Разломообразование и сейсмичность в литосфере. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. Т. 1. С. 89–94.
- Ризниченко Ю.В. Энергетическая модель сейсмического режима // Физика Земли. 1968. № 5. С. 3–19.
- Ризниченко Ю.В., Артамонов А.М. Развитие энергетической модели пространственно-временного хода сейсмичности // Физика Земли. 1975. № 12. С. 35–42.
- Риктакте Т. Предсказание землетрясения. М.: Мир, 1979. 388 с.
- Рогожин Е.А. Геодинамика и сеймотектоника // Проблемы эволюции тектоносферы. М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 1997. С. 84–92.
- Родкин М.В. Флюидометаморфогенная модель сеймотектогенеза // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 181–200.
- Ружич В.В. Геологический путь к очагу землетрясения // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. М.: ИФЗ РАН, 2009. Т. 2. С. 132–141.
- Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.
- Рыкунов А.Л., Смирнов В.Б. Общие особенности сейсмической эмиссии на различных временных масштабах // Известия АН СССР. Физика Земли. 1985б. № 6. С. 83–87.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 95 с.
- Сидорин А.Я. Зависимость времени проявления предвестников землетрясений от эпицентрального расстояния // Доклады АН СССР. 1979. Т. 245. № 4. С. 825–828.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В., Левина В.И. Опыт применения кинематических предвестников сейсмического поля для прогноза землетрясений на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. М.: Наука, 2005а. С. 216–227.
- Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Левина В.И. Использование сейсмологических данных для изучения скоростного строения активной вулканической зоны // Вулканология и сейсмология. 2005. № 2. С. 45–56.
- Соболев Г.А., Ратушный В.В., Кушнир Г.С. Концепция прогноза землетрясений в СССР М.: ИФЗ АН СССР, 1990. 172 с.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии // Экстремальные природные явления и катастрофы. М.: ИФЗ РАН, 2010. Т. 1. С. 15–43.
- Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ИФЗ РАН, 2002. 236 с.
- Справочник физических констант горных пород. М.: Мир, 1969. 543 с.
- Сывороткин В.А. Рифтогенез и озоновый слой. М.: Геоинформмарк, 1996. 68 с.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Влияние мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152–160.
- Трапезников Ю.А. Вопросы пространственно-временного распределения землетрясений и их предвестников // Проявление гео-
- динамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. С. 139–150.
- Тсубои Ч. Энергия землетрясений, объем гипоцентральной области, площадь афтершоков и прочность земной коры // Слабые землетрясения. М.: Иностранная литература, 1961. С. 160–164.
- Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения // Доклады АН СССР. 1967. Т. 176. № 2. С. 319–323.
- Уткин В.И., Юрков А.К. Радон – индикатор геодинамических процессов // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4. С. 74–85.
- Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможностях количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
- Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской зоны. М.: Наука, 2005. 302 с.
- Физические процессы в очагах землетрясений / Ред. М.А. Садовский, В.И. Мячкин. М.: Наука, 1980. 282 с.
- Филатов С.К. Эквиваленты по температуре для деформаций кристаллов, горных пород и земных оболочек // Доклады АН СССР. 1987. Т. 296. № 4. С. 955–959.
- Флюидные потоки в земной коре и мантии. М.: ИНГЕМ РАН, 2002. 217 с.
- Фундаментальные проблемы общей тектоники / Под ред. Ю.М. Пуцаровского. М.: Научный мир, 2001. 520 с.
- Хаврошкин О.Б. Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии. М.: ИФЗ РАН, 1999. 289 с.
- Челдизе Т.Л. Перколяционная модель разрушения твердых тел и прогноз землетрясений // Доклады АН СССР. 1979. Т. 246. № 1. С. 51–53.
- Чиков Б.М. Сдвиговое стресс-структурообразование в литосфере: разновидности, механизмы, условия // Геология и геофизика. 1992. № 9. С. 3–37.
- Чиков Б.М., Каргаполов С.А., Ушаков Г.Д. Экспериментальное стресс – преобразование пироксенита // Геология и геофизика. 1989. № 6. С. 75–79.
- Шаров В.И. Тектоническое землетрясение как неравновесный термодинамический процесс разрушения горных пород. К проблеме смены парадигмы сейсмологии // Физика Земли. 1992. № 2. С. 122–127.
- Шерман С.И. Деструкция литосферы и ее реализация в разломообразовании и сейсмичности: разработка тектонофизической модели сейсмической зоны // Разломообразование и сейсмичность в литосфере. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. Т. 2. С. 77–80.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: «Наука» СО АН СССР, 1983. 110 с.
- Шулейкин В.Н., Поликарпов А.М. О связи глобальных микроколебаний Земли с локальными гидрогеологическими и атмосферными процессами // Физические основы сейсмического метода. Нетрадиционная геофизика. М.: Наука, 1991. С. 178–190.
- Электромагнитные предвестники землетрясения / Ред. М.А. Садовский. М.: Наука. 1982. 88 с.
- Adushkin V.V., An V.A., Kaazik P.B., Ovchinnikov V.M. Dynamic Processes within the Earth's Internal Geospheres: Evidence from the Seismic Wave Traveltime Data // Doklady Earth sciences. 2001. V. 381A. № 9. P. 1119–1121.
- Astafurov S.V., Shilko E.V., Ruzhich V.V., Psakhie S.G. Effect of local stress on the interface response to dynamic loading in faulted crust // Russian Geology and Geophysics. 2008. V. 49. № 1. P. 52–58. doi:10.1016/j.rgg.2007.12.007.
- Bak P., Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // Journal of Geophysical Research. 1989. V. 94. № B11. P. 15635–15637. doi:10.1029/JB094iB11p15635.
- Boldyrev S.A. Seismotectonics of the Lithosphere of Active Oceanic Margins // Doklady Earth Sciences. 2002. V. 386. № 7. P. 795–798.
- Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // Science. 1966. V. 153. P. 990–992. doi:10.1126/science.153.3739.990.

- Chen Young, Wang Wei, Ji Ying. Multidisciplinary approach used in expert systems for earthquake prediction in China // 20 General assembly IUGG: Program and abstr. Vienna: IASPEI. 1991. P. 296.
- Doda L.N., Dushin V.R., Natyaganov V.L., Smirnov N.N., Stepanov I.V. Earthquakes forecasts following space-and ground-based monitoring // *Acta Astronautica*. 2011. V. 69. № 1–2. P. 18–23. doi:10.1016/j.actaastro.2011.02.012.
- Evaluation of proposed earthquake precursors. Wyss M. (Ed.). AGU. Washington, D.C., 1991.
- Firstov P.P., Shirokov V.A. Dynamics of Molecular Hydrogen and Its Relation to Deformational Processes at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Test Site: Evidence from Observations in 1999–2003 // *Geochemistry International*. 2005. V. 43. № 11. P. 1056–1064.
- Geller R.J. Shake-up for earthquake prediction // *Nature*. 1991. V. 352. № 6333. P. 275. doi:10.1038/352275a0.
- Gol'din S.V., Dyad'kov P.G., Dashevskii Yu.A. The South Baikal geodynamic testing ground: strategy of earthquake prediction // *Geologiya i Geofizika (Russian geology and geophysics)*. 2001. V. 42. № 10. P. 1484–1496.
- Grigorian A.G. Local geomagnetic field variations of external origin: A case study of Armenia // *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2007. V. 43. № 6. P. 524–531. doi:10.1134/S1069351307060109.
- Gufeld I.L. Radio-Wave Precursors of Earthquakes // *Journal of Earthquake Prediction Research*. 1992. V. 1. № 1. P. 59–70.
- Gufeld I., Gusev G., Pokhotelov O. Is the Prediction of Earthquake Dates Possible by the VLF Radio Wave Monitoring Method? // *Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction*. Tokio: TSPC, 1994. P. 381–389.
- Gufeld I.L., Gusev G.A., Matveeva M.I., Lyutikov R.A. A Radiation model of seismic process // *Journal of Earthquake Prediction Research*. 1997. V. 6. № 5. P. 333–355.
- Gufeld I.L. Physicochemical mechanics of large crustal earthquakes // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2008. V. 2. № 1. P. 55–58. doi:10.1134/S0742046308010053.
- Gufeld I.L., Gavrilov V.A., Korol'kov A.V., Novoselov O.N. Endogenous Activity of the Earth and Decompression Model of Seismic Noise // *Doklady Earth Sciences*. 2008. V. 423. № 9. P. 1510–1513 doi:10.1134/S1028334X08090420.
- Gufeld I.L., Afanas'ev A.V., Afanas'eva V.V., Novoselov O.N. Trigger Effects of Seismotectonic Processes in a Dynamically Changing Geological Medium // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 433. № 1. P. 901–905. doi:10.1134/S1028334X10070123.
- Gufeld I.L., Matveeva M.I. Barrier Effect of Degassing and Destruction of the Earth's Crust // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 438. № 1. P. 677–680. doi:10.1134/S1028334X11050199.
- Kanamori H. The nature of seismicity patterns before large earthquakes // *Earthquake Prediction. International Review*. American geophysical union, 1981. P. 1–19.
- Kopnichen Yu.F., Sokolova I.N. Annular Seismicity Structures and the March 11, 2011, Earthquake (Mw=9.0) in Northeast Japan // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 440. № 1. P. 1324–1327 doi:10.1134/S1028334X11090194.
- Kopnichen Yu.F., Sokolova I.N. Spatiotemporal Variations of the S Wave Attenuation Field in the Source Zones of Large Earthquakes in the Tien Shan // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2003. V. 39. № 7. P. 568–579.
- Lau T., Wallace T.C. Modern global seismology. San Diego: Academic Press, 1995.
- Leonov Yu.G. Tectonic Mobility of the Platform Crust at Different Depths // *Geotectonics*. 1997. V. 31. № 4. P. 279–293.
- Letnikov F.A., Dorogokupets P.I. The Role of Superdeep Fluid Systems of the Earth's Core in Endogenic Geological Processes // *Doklady Earth Sciences*. 2001. V. 378. № 4. P. 500–502.
- Ma Li, Chen Jianmin, Chen Qifu, Liu Guiping. Features of precursor fields before and after the Datong-Yang-gao Earthquake swarm. *Journal of Earthquake Prediction Research*. 1995. V. 4. № 1. P. 1–30.
- Mogi K. Two kinds of seismic gaps // *Pure and Applied Geophysical*. 1979. V. 117. P. 1172–1186. doi:10.1007/BF00876213.
- Nature rarely repeats itself // *Economist*. 1997. August 2. P. 63.
- Niazi M. Regression analysis of reported earthquake precursors // *Pure and Applied Geophysics*. 1984–1985. V. 122. P. 966–981. doi:10.1007/BF00876396.
- Normile D. Chair quits Japan panel in protest // *Science*. 1996. V. 271. P. 1799. doi:10.1126/science.271.5257.1799.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin: Springer, 2004. 215 p.
- Reid H.F. The California earthquake of April, 18, 1906. The Mechanics of the earthquake. Washington: The Carnegie Inst. 1910. V. 2.
- Rodkin M.V. The Problem of the Earthquake Source Physics: Models and Contradictions // *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2001. V. 37. № 8. P. 653–662.
- Rodkin M.V. Implications of differences in thermodynamic conditions for the seismic process // *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2006. V. 42. № 9. P. 745–754. doi:10.1134/S1069351306090047.
- Sidorin A.Ya. Midday Effect in the Time Series of Earthquakes and Seismic Noise // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 403. № 5. P. 771–776.
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: A physical basis // *Science*. 1973. V. 181. № 4102. P. 803–809. doi:10.1126/science.181.4102.803.
- Scholz C.H., Aviles C.A., Wesnuky S.G. Scaling differences between large interplate and intraplate earthquakes // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1986. V. 76. № 1. P. 65–70.
- Sherman S.I. A Tectonophysical Model of a Seismic Zone: Experience of Development Based on the Example of the Baikal Rift System // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2009. V. 45. № 11. P. 938–951. doi:10.1134/S1069351309110020.
- Sherman S.I., Gorbunova E.A. New Data on the Regularities of the Earthquake Manifestation in the Baikal Seismic Zone and Their Forecast // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 435. № 2. P. 1659–1664. doi:10.1134/S1028334X10120238.
- Sherman S.I., Sorokin A.P., Sorokina A.T., Gorbunova E. A., Bormotov V. A. New Data on the Active Faults and Zones of Modern Lithosphere Destruction in the Amur Region // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 439. № 2. P. 1146–1152. doi:10.1134/S1028334X11080186.
- Skvortsova Z.N. Deformation by the Mechanism of Dissolution–Reprecipitation as a Form of Adsorption Plasticization of Natural Salts // *Colloid Journal*. 2004. V. 66. № 1. P. 1–10.
- Tronin A.A., Hayakawa M., Molchanov O.A. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China // *Journal of Geodinamic*. 2002. V. 33. № 4–5. P. 519–534. doi:10.1016/S0264-3707(02)00013-3.
- Tsubokawa I. On relation between duration of crystal movement and magnitude of earthquake expected // *Journal Geodinamic. Society of Japan*. 1969. V. 15. № 6. P. 75–88.
- Zhang Guomin, Zhang Zhaocheng. The study of multidisciplinary earthquake prediction in China // *Journal of Earthquake Prediction Research*. 1992. V. 1. № 1. P. 71–85.



**Гуфельд Иосиф Липович**, докт. физ.-мат. наук., г.н.с.  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
123995, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, Россия  
Тел.: (916) 47-94-258; ✉ e-mail: [igufeld@korolev-net.ru](mailto:igufeld@korolev-net.ru)

**Gufeld, Iosif L.**, Doctor of Physics and Mathematics, Chief researcher  
The Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS  
123995, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya street, 10, GSP-5, Russia  
Tel.: (916)47-94-258; ✉ e-mail: [igufeld@korolev-net.ru](mailto:igufeld@korolev-net.ru)



**Матвеева Маргарита Ивановна**, канд. техн. наук, с.н.с.  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
123995, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, Россия  
Тел.: (916)135-55-74

**Matveeva, Margarita I.**, Candidate of Technical Sciences, Senior researcher  
The Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS  
123995, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya street, 10, GSP-5, Russia  
Tel.: (916)135-55-74



**Новоселов Олег Николаевич**, докт. техн. наук, профессор кафедры информационно-измерительных систем и технологий приборостроения  
Московский государственный университет леса  
141005, Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, 1, Россия  
Тел.: (916) 124-38-85; e-mail: [onn@mgul.ac.ru](mailto:onn@mgul.ac.ru)

**Novoselov, Oleg N.**, Doctor of Technical Sciences, professor of the Information-Measuring Systems and Instrument-Making Technology Department  
Moscow State University of Forest  
141005, Mytischy-5, 1-st Institutskaia street, 1, Russia  
Tel.: (916) 124-38-85; e-mail: [onn@mgul.ac.ru](mailto:onn@mgul.ac.ru)