



GEOLOGICAL CONSEQUENCES OF AMORPHIZATION OF THE LITHOSPHERE AND UPPER MANTLE STRUCTURES CAUSED BY HYDROGEN DEGASSING

I. L. Gufeld

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

Abstract: Formation of the geological medium boundaries and patterns is specific, but such specific features have not been fully considered yet. No consideration is given to the nature of periodic variations of various parameters of the geological medium from the surface to the depth of the upper mantle. Remarkable are properties of inter-block/inter-plate marginal structures that ensure steady and quite contrasting movements of blocks, and it is of interest which processes provide for such properties. Another related question is why insignificant attention is still given to some variations of geophysical fields that might be interpreted as precursors of large-scale fracturing? Degassing (first of all, hydrogen degassing), P–T parameters at any depth level, and pressure of the upper layers determine the crystalline structure of the medium, including layers between blocks. Due to combinations of these impacts, principally new conditions are established, in which amorphized/irregular and regular structures are formed. Such a two-phase system, including a variable number of regular/crystalline and irregular/amorphized phases, may be responsible for specific and unique spatial geological structures, such as the Moho, blocks and ‘subduction’ zones, and variations of their parameters. The stable amorphized structure of the boundary interlayers facilitates sliding of blocks against each other, which does not permit any control of transfer of movements to rapid displacements followed by strong earthquakes. This article considers the nature of processes that generate amorphized structures in the geological medium and geological consequences of such processes.

Key words: lithosphere, upper mantle, medium structure, hydrogen degassing, amorphized structure, the Moho, subduction zone.

Recommended by V.V. Ruzhich 2 December 2012

Citation: Gufeld I.L., 2012. Geological consequences of amorphization of the lithosphere and upper mantle structures caused by hydrogen degassing. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (4), 417–435. doi:10.5800/GT-2012-3-4-0083.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ АМОРФИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ЛИТОСФЕРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ, ВЫЗВАННЫЕ ВОДОРОДНОЙ ДЕГАЗАЦИЕЙ

И. Л. Гуфельд

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация: Особенности формирования границ и структуры геологической среды не учитываются в полной мере. Не рассматривается природа периодических изменений различных параметров среды от поверхности до глубин верхней мантии. Удивительны свойства граничных межблоковых (межплитовых) структур, обеспечивающие устой-

чивое и весьма контрастное движение блоков относительно друг друга. Какими процессами обеспечиваются эти свойства? Отсюда также следует вопрос, почему ускользают от нашего внимания какие-либо возмущения геофизических полей, которые можно было бы трактовать как предвестники крупномасштабных разрывов. Дегазация, прежде всего водородная, Р–Т параметры на любой глубине и давление вышележащих слоев будут определять кристаллическую структуру среды, включая межблоковые прослойки. Совокупность этих воздействий создает принципиально новые условия, следствием которых будет формирование аморфизированных (неупорядоченных) и упорядоченных структур. Такая двухфазная система с различным соотношением упорядоченной (кристаллической) и неупорядоченной (аморфизированной) фаз может быть ответственной за своеобразное и уникальное формирование пространственных геологических структур, включая границы Мохо, блоки и зоны «субдукции», и вариации их параметров. Устойчивая аморфизированная структура граничных прослоек обеспечивает скольжение блоков относительно друг друга, что не позволяет пока контролировать переход движений к быстрой подвижке, за которой следуют сильнейшие землетрясения. В работе рассмотрена природа процессов формирования аморфизированных структур в геологической среде и геологические следствия этих процессов.

Ключевые слова: литосфера, верхняя мантия, структура среды, водородная дегазация, аморфизация структуры, граница Мохо, зона субдукции.

Непрерывность частей есть причина ясности.
Сэр Томас Браун

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время можно с уверенностью говорить, что процессы дегазации играют определяющую роль в формировании структуры и оболочек планеты [Larin, 1980; Osika, 1981; Orlyonok, 1985; Voitov, 1986; Marakushev, 1992; Letnikov, 2001; Gilat, Vol, 2012]. Однако вряд ли можно говорить, что существует непротиворечивое понимание процессов, развивающихся в различных оболочках Земли, начиная от ядра и заканчивая верхней корой. Чаще всего судят о механизмах глубинных процессов по наблюдению тех или иных явлений в контролируемом коровом слое, экстраполируя их развитие на еще большие глубины. Однако такая экстраполяция не повышает уровень знаний о процессах на больших глубинах.

В то же время имеются данные наблюдений и результаты мониторинга литосферы и верхней мантии, не вызывающие сомнений, которые можно использовать для обсуждения протекающих процессов. Следует также иметь в виду, что моделирование процессов, возможно протекающих в оболочках Земли, можно считать в определенной мере условным, так как мы не можем учесть масштабы планетарных процессов. Судим мы о них на уровне понимания локальных процессов в зависимости от Р–Т параметров и особенностей крупномасштабных структур. Необходимо же стремиться также к анализу на основе известных и понимаемых данных физического материаловедения, оставляя без дискуссий красивые гипотезы и идеи, которые сейчас нельзя ни подтвердить, ни опровергнуть.

В представленной работе будут рассмотрены особенности параметров и наблюдаемых процессов в литосфере и верхней мантии, которые отражают реакцию среды на восходящие потоки глубинных газов, и пре-

жде всего водорода и гелия. Особое внимание обратим на процессы аморфизации структуры и ее проявление для их последующего объяснения. Интерес к этим проблемам связан с развитием исследований по глубинному генезису нефтяных и газовых месторождений, где роль структуры среды и степень ее деструкции для формирования резервуаров очевидны, и попытками найти выход из тупика в прогнозе сильнейших коровых землетрясений. В проблеме прогноза землетрясений основным является, с нашей точки зрения, понимание природы процессов в граничных структурах и возможностей мониторинга этих процессов.

2. ЛИТОСФЕРА

Говоря о литосфере, необходимо, прежде всего, учитывать данные сверхглубокого бурения [Kozlovsky, 1984], которые имеют ключевое значение для понимания многих процессов, но до сих пор недостаточно осмыслены.

Начиная уже с глубин 4–5 км образцы керна были с «саморазрушением», далее наблюдалось прогрессирующее дискование (разрушение) керна до весьма малых размеров. Максимальные значения плотности и скоростей сейсмических волн, а также минимальная пористость фиксировались 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 оста-

ется «сплошным» только для прохождения упругих волн. В реальности материал пронизан сеткой связанных трещин и пор, заполненных газом под большим давлением и частично жидким флюидом. С увеличением глубины концентрация водорода и гелия во флюиде увеличивается. Начиная с глубины 2.8–3.0 км содержание водорода становится преобладающим. С отметки около 6 км содержание гелия в воде становится соизмеримым с содержанием водорода. Можно говорить о накоплении гелия за счет проявления барьерного эффекта [Gufeld et al., 2011]. Сейсмическая граница (около 7 км), которая ранее интерпретировалась как граница гранит – базальт, на самом деле представляет собой зону деструкции среды (зону трещиноватости). Среда на глубинах больше 6 км переходит в разрушенное состояние – состояние деструкции. Однако характер деструкции и разрушения не соответствует развитию трещиноватости, обусловленной только реологическими свойствами при соответствующих P–T параметрах [Nikolaevsky, 1980, 1982]. Механизм деструкции здесь другой и связан в значительной мере с процессами взаимодействия среды с восходящими потоками водорода и гелия.

Лабораторное моделирование разрушения образцов при имплантации в них водорода и/или гелия подтверждает реальность такой деструкции среды [Gufeld et al., 2011]. Таким образом, за счет наличия газовой компоненты и последствия взаимодействия водорода и гелия с твердой фазой, а также действия P–T параметров [Nikolaevsky, 1980, 1982] среда глубоко текстурирована и раздроблена. Трещиноватость и раздробленность свойственны среде вплоть до границы Мохо [Gufeld et al., 2011]. Формирование трещиноватости связано с процессами образования газовых пор (водородных, гелиевых и более сложных газов) и их цепочек. При этом реально достигается такое давление газа в порах, которое вызывает образование трещин у пор (рис. 1, 2). Такая ситуация прослеживалась при моделировании, а также на исходных образцах горных материалов. Роль водородной и гелиевой дегазации состоит не только в формировании дополнительной трещиноватости и пористости.

Особенностью литосферы геологической среды являются быстрые (часы, сутки) и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния (ОНС), которые рассматриваются как реакция среды на взаимодействие восходящих потоков легких газов с твердой фазой [Gusev, Gufeld, 2006; Gufeld, 2007]. Общим следствием имплантации легких газов в различные материалы может быть формирование внутреннего напряженного состояния, проявляющегося в эффектах ползучести и изменениях объема (1–6 %). Аналогичные эффекты наблюдаются в горных минералах со значительным содержанием урана и тория, а также при лабораторном моделировании (оливин, пироксен, кварцит и др.). Однако в горных материалах были обнаружены особенности проявления процессов релак-

сации [Gufeld et al., 1993, 1997].

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 находятся в вакансиях и порах. Лауэграммы таких образцов отражают правильную кристаллографическую симметрию. В процессе выдержки образцов (после дегазации в безмасляном вакууме) при различной температуре в среде гелия или водорода наблюдались изменения кристаллографической структуры. Лауэграммы этих образцов отражают уже текстуру деформации. 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 (аморфизация контролировалась по размытию отражений при малых углах) и появление сверхструктурных линий (последнее, по-видимому, связано с появлением водородной или гелиевой подрешеток) (рис. 3). При этом, как уже отмечено выше, исходные образцы горных материалов разрушались за счет формирования цепочек микропор.

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. Уже при вакуумировании исходных образцов, например оливина или кварцита, параметры структуры очень быстро изменяются. Горные материалы оказываются весьма чувствительными к парциальному давлению легких газов в окружающем пространстве [Gufeld et al., 1998].

Дегазация исходных образцов горных материалов также показывает особенности сформировавшейся пористой структуры. В качестве иллюстрации приведем особенности дегазации образцов кварцита (рис. 4). Синхронность дегазации различных газов связана с вскрытием множества пор за счет возникающих термических напряжений. Дегазация образцов слабо зависит от температуры, что связано с уже существующей системой связанных микротрещин и пор. С учетом количества 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., 2011].

Вариации объема кристаллических структур при

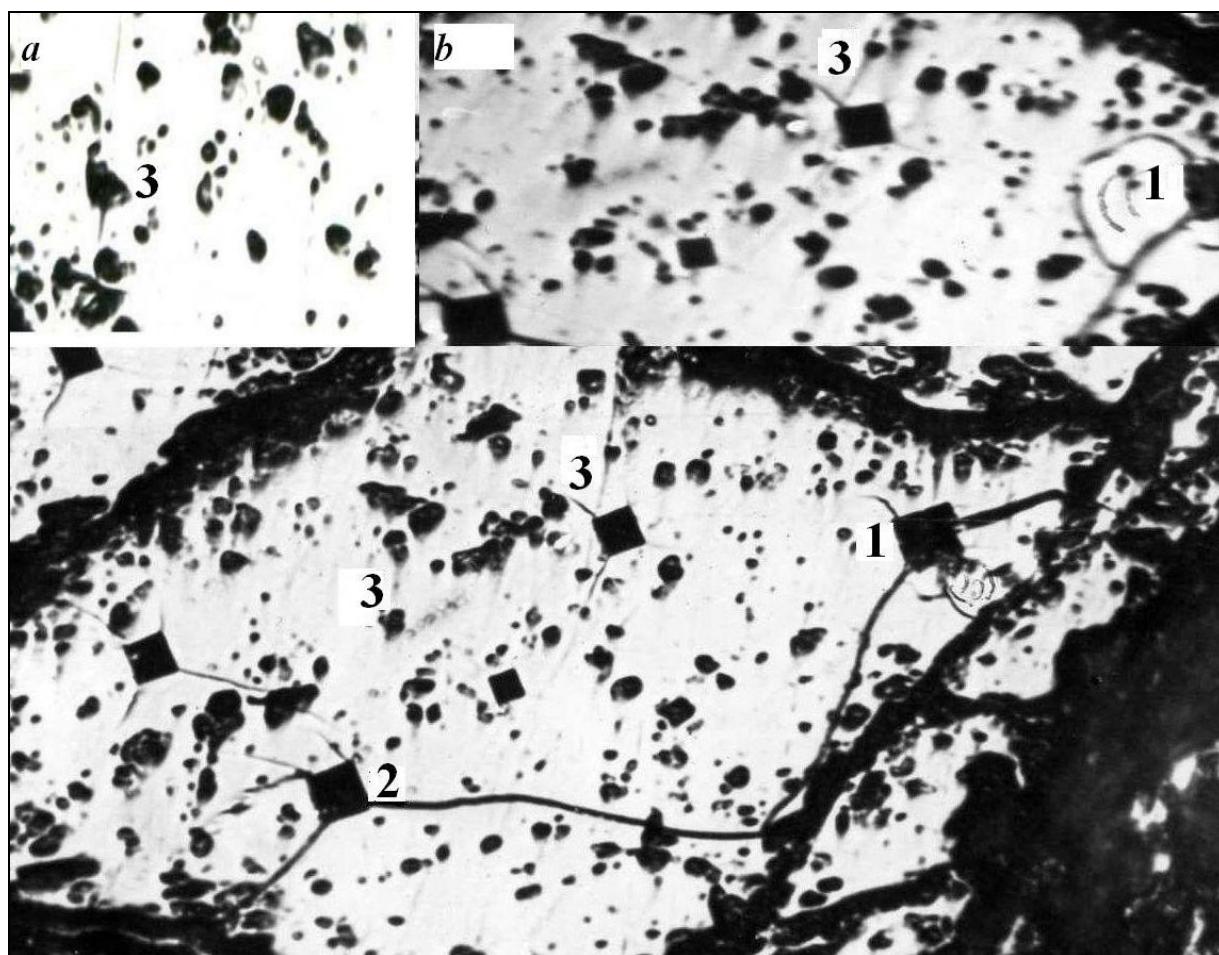


Рис. 1. Структура кристалла оливина, выделенного из гарцбургита, длительное время находившегося в нормальных условиях. $\times 300$. Нестабильность структуры кристалла активизирована нагрузкой алмазного индентора. Темные полосы и пятна – цепочки пор и отдельные поры. 3 – трещины у пор. Врезки: *a* – отдельная пора с микротрещиной, ниже нее – трещина между порами. $\times 600$. *b* – снимок через семь суток, слева и справа у отпечатка 1 просматриваются дислокационные розетки.

Fig. 1. The structure of the olivine crystal extracted from harzburgite, which was in normal conditions for a long time. $\times 300$. Instability of the crystal structure was triggered by a diamond indenter's load. Dark bands and spots show chains of pores and isolated pores. 3 – fissures near pores. Insets: *a* – an isolated pore with a micro fissure; below is a fissure between pores. $\times 600$. *b* – the photo was taken seven days later; rosettes of dislocation are observed at the left and right sides of Indenter's Impress 1.

прохождении через них потоков легких газов могут быть перенесены на реальную среду. Такие обратимые вариации зависят от параметров и плотности восходящих потоков и реальны для любой зоны. Возможно крупномасштабное деформирование литосферы за счет внутривещного давления легких газов. Приведем оценки для потоков гелия. Использовались минимальные концентрации гелия для океанической ($<10^{18}$ ат/кг) и континентальной (10^{20} ат/кг) коры [Azbel, Tolstikhin, 1988]. В диапазоне значений температур 200–600 °С и микропорах с радиусом $r=10^{-8}$ – 10^{-3} м внутривещное давление только за счет диффузии и скопления в них гелия может достигать величин 10–20 кбар и более. Такое давление достаточно, чтобы вызвать локальную деформацию, проявляющуюся первоначально в виде полос скольжения и развивающуюся в дальнейшем в микротрещины. Развитие таких

микротрещин было отмечено выше.

Для реализации крупномасштабного деформирования среды необходимо соблюдение двух условий [Gufeld et al., 1998; Gufeld, 2007]. Первое условие определяет требование к концентрации микропор: расстояние между микропорами должно иметь порядок длины дислокационного стока. Судя по анализу плотности пористой структуры, это требование реализуется, длина дислокационного стока составляет десятки микрон (см. рис. 1 и 2). Второе требование выражает условие нарушения равновесия вокруг поры:

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

где P – внутривещное давление газа, γ – поверхностная энергия, σ – модуль сдвига, b – вектор Бюргерса,

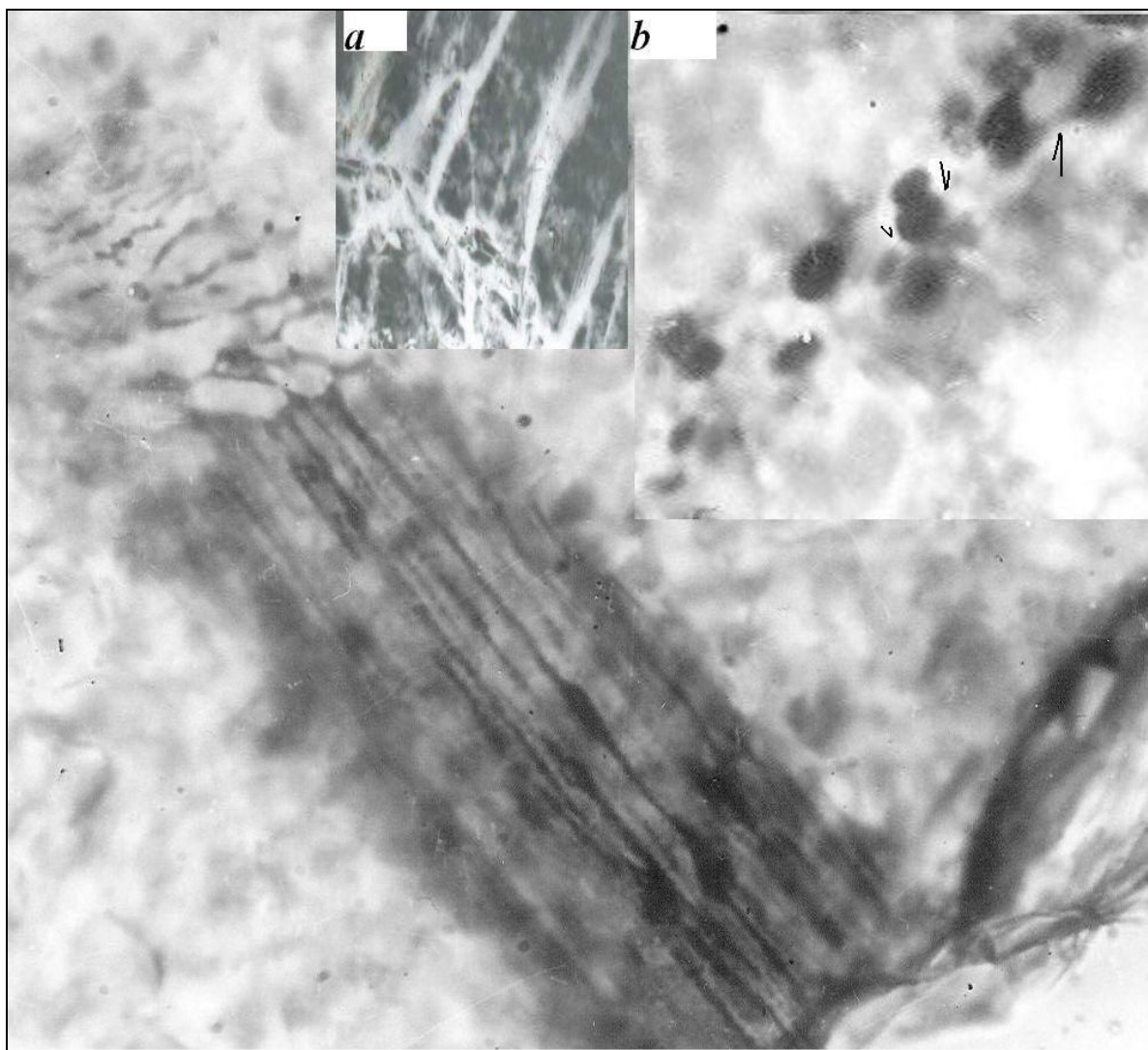


Рис. 2. Тонкая дефектная структура кристалла оливина после имплантации гелия. «Струйное течение». На фронте «струйного течения» – дислокационная структура. $\times 600$. Врезки: *a* – общий вид полос с дефектной структурой. $\times 60$. Такие полосы пронизывают кристалл в различных направлениях, вдоль некоторых полос происходит дробление кристалла из-за образования цепочек пор; *b* – цепочки пор, выделенные в направлении, перпендикулярном диффузии гелия. $\times 300$.

Fig. 2. The thin faulted structure of the olivine crystal after implantation of helium. ‘Jet flow’. At the background of the ‘jet flow’, a dislocation structure is observed. $\times 600$. Inserts: *a* – general view of bands with the faulted structure. $\times 60$. Such bands are piercing the crystal in various directions, and the crystal is fragmented along some of the bands; *b* – chains of pores in the direction perpendicular to diffusion of helium. $\times 300$.

L – литостатическое давление. Это условие также реализуется, так как наблюдаются микротрещины вокруг пор.

Для приведенных концентраций гелия эти условия выполняются при $L < 10\text{--}15$ кбар (глубина меньше 30–35 км, т.е., примерно до границы Мохо) и равномерном распределении микропор с радиусами 10^{-8} м $< r < 10^{-6}$ м.

Присутствие в среде восходящих потоков водорода (концентрация водорода превышает концентрацию гелия на три порядка) делает существенно менее критичными условия формирования газовой пористости, увеличивая радиус поры до 10^{-4} м, но монотонное увеличение плотности с глубиной увеличивает энергию

образования вакансий и, следовательно, уменьшает возможности формирования газовой пористости. 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.

Газовая пористость характерна для многих горных материалов, уже длительное время находящихся в нормальных условиях. Средний объем открытых пор составлял (10^{-3} м³/кг): кварцит – 0.0021, лерцолит – 0.0043, гарцбургит – 0.0061, габбро – 0.0067, оливин

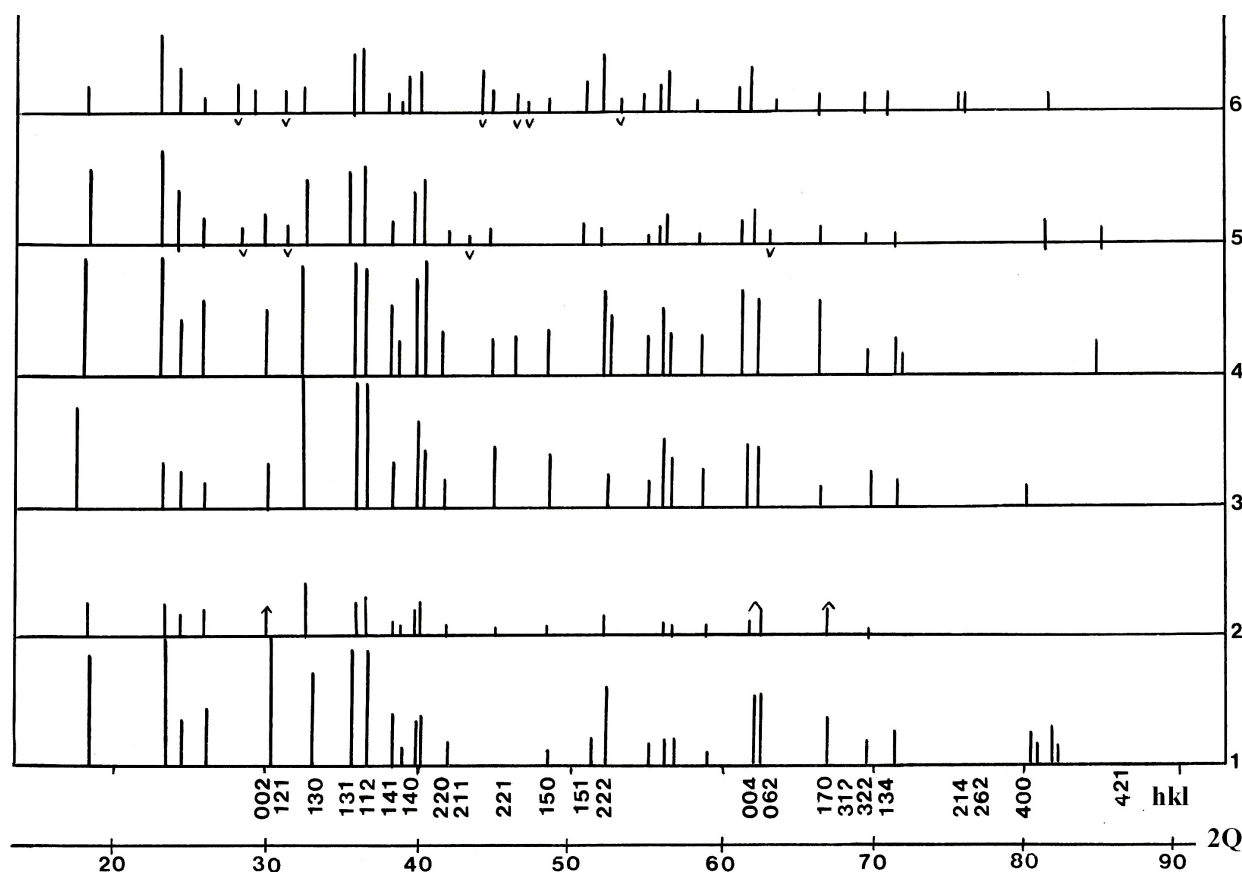


Рис. 3. Штрих-диаграмма рентгеновских отражений кристалла оливина после термообработки в среде гелия: *hkl* – индексы плоскостей отражения. *2Q* – угол отражения. *P* – давление гелия в камере. 1 – исходный образец; 2, 3, 4 – *P*=0.1 МПа, время имплантации 2, 5 и 10 часов; 5 – *P*=100 МПа, время 1 час; 6 – среда водород, давление 40 МПа, время 1 час. Галочка – размытые линии.

Fig. 3. The bar-chart of X-ray reflections of the olivine crystal after thermal treatment in the helium medium. *hkl* – indexes of reflection planes; *2Q* – reflection angle; *P* – pressure of helium in the chamber; 1 – original sample. 2, 3, 4 – *P*=0.1 MPa; implantation for 2, 5, and 10 hours; 5 – *P*=100 MPa, 1 hour; 6 – hydrogen medium, *P*=40 MPa, 1 hour. Ticks show blurred lines.

0.0028, кварц – 0.0020. Плотность пор такая, что расстояние между ними близко к длине дислокационного стока [Gufeld et al., 2011].

За геологические времена восходящие потоки легких газов и других атомов внедрения 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 междоузельному механизму (без захвата в уже занятые вакансии или другие дефекты). Коэффициент диффузии здесь может достигать значений $D \sim 10^{-9} - 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ и существенно более высоких в диапазоне 200–600 °C. В направлении поверхности Земли температура будет уменьшаться, следовательно, будет уменьшаться и коэффициент диффузии. Одновременно увеличивается газовая пористость и развивается дополнительная трещиноватость. Верхние слои становятся на определенный период барьером (барьерный эффект), ограничивающим процесс дегазации через твердую фазу в вышележащие горизонты. Это

приводит к накоплению легких газов в различных горизонтах среды, начиная от границы Мохо и выше, а также формированию сейсмических границ (в том числе наклонных) и расслоению среды из-за влияния легких газов на структуру и упругие параметры [Gufeld, 2007]. Естественно, что накопление легких газов в отдельных горизонтах не может быть долговечным. За счет градиента давления растворенных в твердой структуре легких газов и при постоянной подкачке газов из глубины возможен их относительно быстрый переход в расположенные выше горизонты, т.е. реализуется эстафетный механизм переноса энергии снизу вверх. Этими процессами можно объяснить появление сейсмических границ, чередование зон с повышенными и пониженными значениями скоростей продольных волн, периодичность в несколько лет времен пробега продольных волн на различных трассах, быструю изменчивость (в течение суток) поля скоростей продольных волн в широком диапазоне глубин, а также непрерывные вариации ОНС литосферы, контролируемые по различным параметрам (см. литературу в [Gufeld,

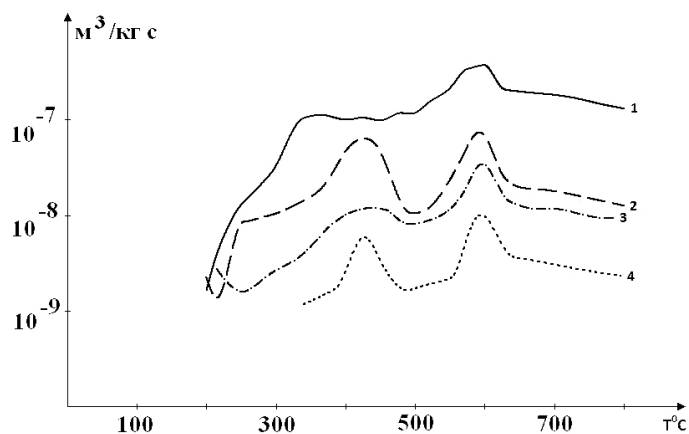


Рис. 4. Зависимость скорости дегазации кварцита от температуры. 1 – H_2O , 2 – CO , 3 – H_2 , 4 – N_2 .

Fig. 4. Velocity of quartzite degassing versus temperature. 1 – H_2O , 2 – CO , 3 – H_2 , 4 – N_2 .

2007]).

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, 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. При этом сток легких газов (вообще всех атомов внедрения) будет происходить по каналу твердая фаза – флюид – твердая фаза – флюид – За счет модуляции восходящих потоков легких газов и барьерного эффекта по глубине установится динамическое чередование зон сжатия и растяжения. Фактически можно говорить о режиме деформационной волны (или эстафетном механизме передачи энергии), распространяющейся в направлении потока легких газов [Gusev, Gufeld, 2006]. Очевидно, что вариации ОНС среды в смежных зонах не будут синхронными. При квазипостоянных градиентах давления и температуры в литосфере влияние на поле напряжений легкоподвижных восходящих потоков легких газов представляется основным переменным фактором, поддерживающим непрерывные вариации различных параметров среды. Учитывая непрерывность потока легких газов, можно оценить постоянную времени этого процесса на размерах зерен минералов: $t = 0.25 l^2/D$, где l – размер зерна. Для $l = 10^{-3} - 10^{-2}$ м получим t порядка суток и менее, что соответствует реальным наблюдениям. Отметим, что появление аморфизированных структур при взаимодействии среды с легкими газами и атомами внедрения увеличивает коэффициент диффузии (подробнее об этом ниже), что оказывает дополнительное влияние на постоянную

времени.

Данные анализа Кольской сверхглубокой скважины укладываются в эти схемы, причем граница на глубине 7 км может быть типичной зоной проявления барьерного эффекта, т.е. зоной трещиноватости, обусловленной процессами газовой деструкции. На рис. 5 показан фрагмент поверхности исходного образца оливина с сеткой параллельных микротрещин как иллюстрация возможного проявления барьерного эффекта в период, когда материал находился еще в недрах Земли. Возможно, что граница Мохо является предельной, ниже которой микроскопическая пористость отсутствует или существенно ограничена. Таким образом граница Мохо представляется первой барьерной зоной с развитой трещиноватостью, где осуществляется накопление легких газов, горизонтальная миграция на большие расстояния (десятки километров и более) и последующий их сброс через флюид и твердую фазу в поверхностную кору.

Таким образом, вариации объемно-напряженного состояния земной коры и ее деструкция (выше границы Мохо) могут быть объяснены реакцией среды на взаимодействие с восходящими потоками водорода и

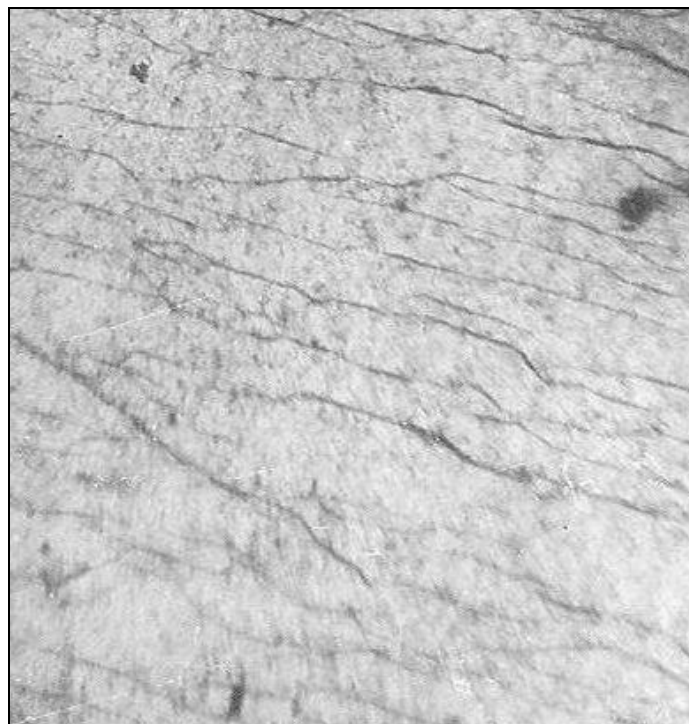


Рис. 5. Особенности микроструктуры кристалла оливина, выделенного из гарцбургита, длительное время находившегося в почти нормальных условиях. Структура субпараллельных трещин, отражающих, возможно, проявление барьерного эффекта, $\times 120$.

Fig. 5. Specific features of the microstructure of the olivine crystal extracted from hargzburgite, which was in almost-normal conditions for a long time. The pattern of sub-parallel fractures may reflect the barrier effect, $\times 120$.

гелия (причем Р–Т параметры также вносят вклад в деструкцию среды [Nikolaevsky, 1980, 1982]). Эти вариации ОНС среды, в том числе быстрые, фактически контролируются «газовым дыханием Земли» (а не медленными тектоническими движениями [Gufeld, 2007]), влияя тем самым на движение и фильтрацию флюидной фазы (поясним, что это происходит за счет непрерывных вариаций объема твердой фазы), а также на формирование резервуаров углеводородов, в том числе в скальных породах фундамента [Gufeld et al., 2011].

В то же время субмикроскопическая пористость, образованная вакансиями, дефектами структуры (дислокациями) и межатомными полостями (тетра- или октапоры), оказывает основное влияние глубже границы Мохо. Следует иметь в виду, что структурные перестройки за счет диффузии легких газов не требуют критических значений Р–Т параметров и реально протекают в широком интервале температур. Анализ ситуаций в верхней мантии более сложен, там наши возможности моделирования ограничены. Однако ряд надежных геофизических наблюдений и общие представления физического материаловедения позволяют рассматривать последствия процессов взаимодействия восходящих потоков легких газов со средой верхней мантии.

3. ВЕРХНЯЯ МАНТИЯ

Что происходит в верхней мантии? Можем ли мы выделить надежно данные, указывающие на происходящие в верхней мантии процессы?

Начнем с глубокофокусных землетрясений, происходящих на глубинах до 700 км. Точнее, формально нужно говорить о крупномасштабных «глубокофокусных разрывах», проявляющихся по измерениям сетью сейсмостанций первых вступлений сейсмических волн в виде быстрого «кажущегося сдвигового процесса», а не «взрыва». Однако «разрыв» на таких глубинах, как механический процесс, не может реализоваться из-за чрезвычайно высоких нормальных давлений вышележащей толщи. Об этом писал еще в 1972 г. Ф. Стейси [Stacey, 1972].

Лишено смысла также обсуждение возможности образования в структурах верхней мантии объемных полостей, заполненных сложными углеводородами и находящимися под большим давлением (что следует из соотношений давления вышележащей толщи, поверхностного натяжения, температуры, реологических параметров среды). Отсюда нет оснований обсуждать и «взрывы» углеводородов в полостях, которые отождествляются рядом авторов с глубокофокусными землетрясениями. То же касается распада соединения He–H [Gilat, Vol, 2005, 2012]. Это сверхвзрывчатка в терминологии российской популярной литературы. Однако если такое вещество находится в газовой фазе, то из-за потерь энергии в столкновениях этих молекул между собой и с обычными молекулами соединение

быстро распадается или не образуется вообще при высоких температурах. Действительно, соединения He–H, полученные при сверхвысоких давлениях в газовой фазе при нормальных температурах, не распадались фиксированным взрывом, так как соединение было крайне неустойчивым. Это хорошо известно. Но если такие молекулы зафиксировать в жесткой кристаллической структуре и химически связать их (это проблема!!), то молекулы He–H могут существовать неограниченно долго. Но это будет, совсем новая химия с другими энергетическими масштабами. К примеру, при распаде самого экзотермического соединения HF выделяется $2 \cdot 10^4$ Дж/кг, а при распаде He–H должно выделиться $4 \cdot 10^5$ Дж/кг. В Земле отсутствуют условия для накопления в устойчивом состоянии соединений водорода и гелия, так же как и углеводородов в мантии.

Попытки связывать «глубокофокусные разрывы» с обратимыми фазовыми переходами принципиально неверны. В условиях всестороннего сжатия фазовый переход может произойти только с уменьшением объема. В дальнейшем обратный переход уже не может происходить скачком, но при этом будет формироваться устойчивая аморфизированная структура. Такая ситуация, как известно, соответствует фазовым переходам, реализуемым под давлением. Если говорить о планетарных условиях в верхней мантии, то на глубинах, для которых Р–Т параметры характерны тем или иным фазовым переходам [Pushcharovskii, 2005], можно ожидать существование размытых сейсмических структур с пониженными скоростями за счет накопления водорода и гелия в межатомных полостях. В качестве иллюстрации можно привести скоростные разрезы верхней мантии [Pavlenkova, 2001; Puzyrev, 1997] (рис. 6). Заметим, что существуют также другие точки зрения на природу этих границ. Эти структуры, по-видимому, устойчивы, но в геологическом масштабе времени они могут смещаться по глубине. Многие наблюдения указывают на подобные процессы, непрерывно протекающие в верхней мантии.

Обратим внимание прежде всего на колебательный режим изменения скоростей продольных волн и ритмичность глубокофокусных землетрясений. Так, обнаружены вариации времен пробега продольных сейсмических волн на планетарных трассах: полигон подземных ядерных взрывов в штате Невада (США) – сейсмическая станция Боровое (Республика Казахстан). Время пробега изменялось с периодами 6–7 и 9–11 лет [Adushkin et al., 2001; An, Lyuke, 1992]. В глубокофокусной сейсмичности Земли также наблюдались временные вариации с периодами 7–9 и 12–14 лет [Poli-karpova et al., 1995]. По геологическим меркам эти времена отражают достаточно быстрые процессы.

В последние 10 лет группой Ю.Ф. Копничева получен большой объем данных о пространственно-временных вариациях S-волн в очаговых зонах сильнейших землетрясений [Kopnichen, Sokolova, 1997, 2003,

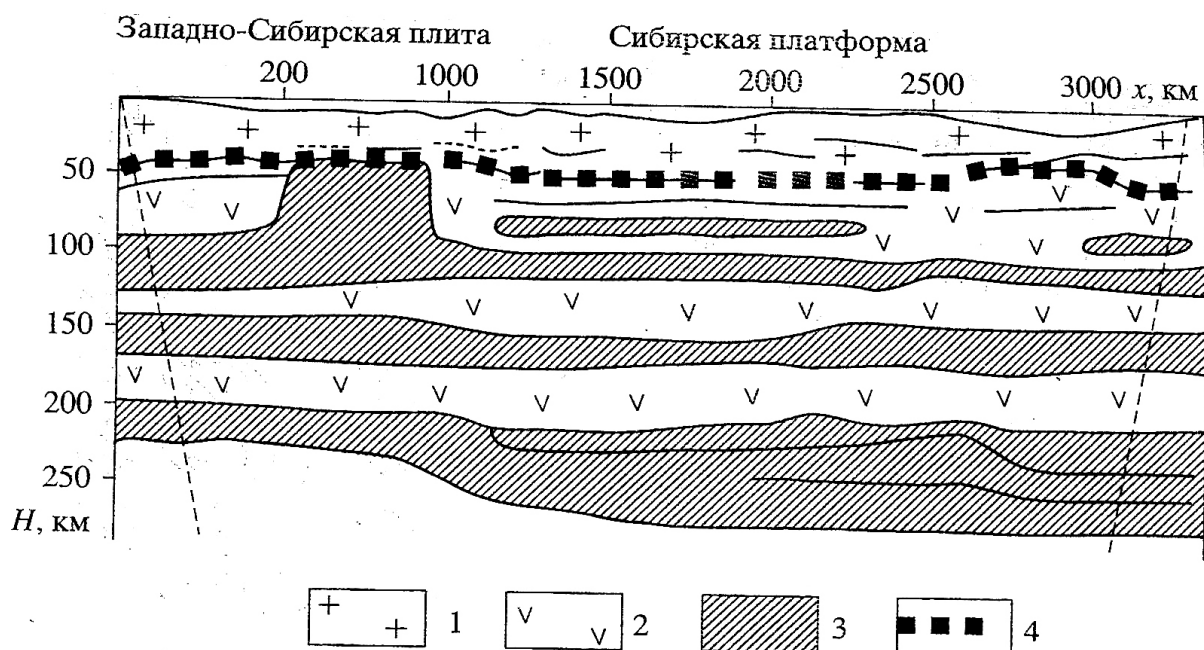


Рис. 6. Скоростные сейсмические разрезы верхней мантии [Puzirev, 1997]. 1 – земная кора; 2 – верхняя мантия; 3 – низкоскоростные зоны мантии; 4 – граница Мохо.

Fig. 6. Velocity seismic profiles of the upper mantle [Puzirev, 1997]. 1 – the Earth's crust; 2 – the upper mantle; 3 – low-velocity zones in the mantle; 4 – the Moho.

2011]. Для анализа использовался метод, основанный на изучении характеристик короткопериодной S-коды записей местных землетрясений и карьерных взрывов. На частотах около 1 Гц кода сформирована в основном поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии и земной коре. Если на огибающей коды выделены участки резкого затухания амплитуд, то они соответствуют слоям высокого поглощения S-волн в соответствующих по глубинам зонах. Разработанный метод, обладающий высокой разрешающей способностью по горизонтали, позволял выделять субвертикальные зоны с измененной эффективной добротностью (рассчитанной по затуханию амплитуд волн) шириной в несколько километров. Было показано существование узких субвертикальных каналов высокого поглощения волн (от нижней коры до глубины около 100 км) в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня и Кавказа. Весьма интересны временные вариации структуры поля поглощения S-волн в очаговых зонах, например данные для зоны Сусамырского землетрясения (Центральный Тянь-Шань, 1997 г.). Примерно за четыре года до землетрясения к югу от очаговой зоны сформировалась область очень высокого поглощения на глубине 45–180 км. В будущей очаговой области сильное поглощение наблюдалось на глубинах 40–125 км. В первые месяцы после землетрясения в области очаговой зоны получено промежуточное поглощение на глубинах 20–200 км. Через семь лет поглощение

существенно уменьшилось на глубинах 20–90 км, но выросло на глубинах 90–170 км. Еще один пример. За полгода до Байсорунского землетрясения (Северный Тянь-Шань, 1990 г.) в средней части коры на глубинах 20–40 км сформировался слой с очень сильным поглощением. Сразу же после землетрясения поглощение в средней коре существенно уменьшилось, а в нижней коре и верхах мантии (40–80 км) – резко возросло. Также было показано, что в течение 25–30 лет после сильных землетрясений Тянь-Шаня резко уменьшается поглощение в верхней мантии и одновременно увеличивается поглощение в нижней коре. Авторы делают вывод, что быстрые (в геологическом масштабе времени) вариации поля поглощения S-волн однозначно свидетельствуют о подъеме мантийных «флюидов» в земную кору. Оценки авторами скоростей подъема «флюида» дают величину в доли миллиметров в секунду. Аналогичные наблюдения представлены для ряда сильнейших землетрясений в зоне субдукции. Приводятся также данные по еще более быстрой реакции сильной коровой сейсмичности на проявление глубокофокусных землетрясений: от нескольких недель до месяцев. Такая связь рассматривалась в Центральной и Южной Азии в сопоставлении с вариациями скорости вращения Земли. С начала прошлого века выделено девять пар таких событий (глубокофокусных с $M > 6.7$ и коровых с $M > 7$). Все пары событий происходили в период долговременного (несколько лет) увеличения скорости вращения Земли. В эти пе-

риоды, что отмечалось также выше [Kopnichev, Sokolova, 1997], наблюдалось резкое затухание S-волн в нижней коре и верхней мантии, т.е. среда в больших объемах перешла в «возбужденное» состояние.

Процессы взаимодействия между верхней мантией и корой обнаруживаются в динамике изменения проводимости перед сильными землетрясениями. О повышении проводимости этих зон перед сильными землетрясениями известно из данных МТЗ. Наблюдалось последовательное изменение проводимости среды от верхней мантии к нижней коре (по данным мониторинга вариаций геомагнитного поля на сети магнитовариационных станций) в период подготовки Спитакского землетрясения [Grigorian, 2007]. Анализ проводился на периодах магнитных возмущений 5–20 мин (глубина контроля 2–10 км), 30–60 мин (глубина контроля 10–20 км) и S_q -вариациях (период 5–20 часов, глубина контроля 100–300 км). Контрольным параметром было отношение амплитуд однопериодных вариаций, синхронно измеряемых на разных парах станций. Заметные изменения параметров верхней мантии начались примерно за 2.5 года до Спитакского землетрясения, а параметров нижней коры – с запозданием на один год. Здесь также автор отмечает влияние на параметры среды высокой скорости продвижения фронта «флюидизации».

Необходимо найти, прежде всего, объяснение слоистой структуре верхней мантии, т.е. чередованию слоев с повышенными и пониженными скоростями, формирование которых также можно связывать с «флюидизацией». О каких «флюидах» в верхней мантии можно говорить?

Естественно, что речь может идти только об атомах внедрения: H, He, C, N, B, F, S, P и некоторых других, диффузия которых осуществляется по междоузельному механизму. Однако здесь необходимо выделить H и He, коэффициенты диффузии которых на многие порядки больше. Обсуждать диффузию сложных соединений в кристаллических или аморфных структурах в среде ниже границы Мохо, как это сделано в ряде работ, в принципе не имеет смысла. Отдельно речь может идти только о комплексах C-H и O-H.

Рассмотрим процессы взаимодействия легких газов с атомами в структурах, определяющих кристаллографическую симметрию. Наиболее сильные изменения происходят в структурах, в которых присутствуют элементы с переменной валентностью (например, Fe в структурах оливина и пироксена). При этом анион кислорода вытесняется из узла решетки гелием или водородом и транспортируется к границе в виде подвижного радикала $\text{OH}^\cdot$. Компенсация уменьшения количества анионов и потери электронейтральности могут осуществляться путем преобразования Fe^{2+} в Fe^{3+} (т.е. FeO в Fe_2O_3). Соответственно изменится стехиометрическое соотношение Fe и Mg в структурах типа оливина и пироксена. Такие преобразования приведут к наблюдаемым уменьшениям параметров кристалличе-

ских структур и в нормальных условиях – к формированию неустойчивого (или неравновесного) состояния. Однако в условиях всестороннего сжатия при P–T условиях верхней мантии такая структура будет устойчивой и, скорее всего, станет аморфной.

При долговременных по геологическим меркам восходящих потоках легких газов ими будут заняты все вакансии. Это означает, что диффузия будет осуществляться по междоузельному механизму. По нашим оценкам коэффициент диффузии водорода и гелия может быть очень высоким и составлять по порядку величины $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. В оценках учитывается, что за счет высокого барического сжатия существенно уменьшается дефектность структуры и увеличивается плотность среды, что уменьшает энергию активации, а также то, что все дефектные места заняты. В то же время растворимость водорода и гелия в твердой фазе верхней мантии остается почти фиксированной. Нужно учитывать также, в каком состоянии диффундирует водород, в атомарном или отдельным протоном. Эксперименты, которые проводились на металлах, не дали однозначного ответа, т.е. диффузия из одной позиции в другую возможна в виде атома водорода или протона.

Параметры кристаллической решетки увеличиваются с уменьшением глубины. С уменьшением глубины амплитуда колебаний диффундирующих к поверхности атомов внедрения, прежде всего водорода, будет увеличиваться. Это означает, что коэффициент диффузии может уменьшиться, это с одной стороны, а с другой стороны, увеличение колебательной энергии приведет к повышению температуры, что может скомпенсировать понижение коэффициента диффузии. В этом процессе осуществляется перенос тепла снизу вверх, по-видимому, без существенных потерь. О выносе тепла восходящими потоками водорода и гелия писал Ф.А. Летников [Letnikov, 2001].

Как известно, с увеличением глубины температура и давление возрастают. Однако их действие на структуру различно. Давление стремится сжать кристаллические структуры, а температурный фактор приводит, наоборот, к расширению кристаллических структур. При этом направление максимальной сжимаемости обычно близко к ориентировке максимального теплового расширения, так что одновременное изменение температуры и давления в одном и том же направлении приводит к частичной компенсации их воздействий. До границы Мохо давление компенсирует термическое расширение примерно на 0.5 величины. С глубиной градиент температуры уменьшается, но сохраняется увеличение градиента давления. В кровле верхней мантии достигается компенсация теплового расширения барическим сжатием пород, и на больших глубинах среда подвергается воздействию возрастающего давления и поэтому сжимается [Klark, 1969; Filatov, 1987]. Однако реальная ситуация несколько иная. За счет преобладающих первичных фазовых превра-

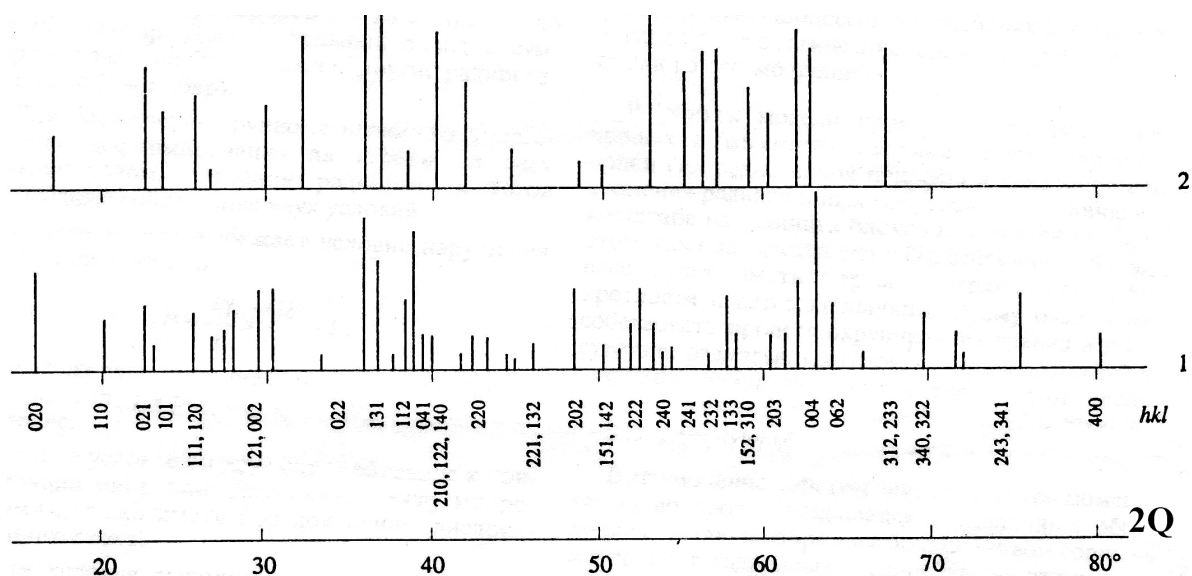


Рис. 7. Штрих-диаграмма рентгеновских отражений кристалла оливина под механической нагрузкой после термообработки в среде гелия: hkl – индексы плоскостей отражения. $2Q$ – угол отражения. p – давление гелия в камере. 1 – исходный образец; 2 – $p = 0.1$ МПа, одноосная механическая нагрузка на образец – 44 МПа, время имплантации 2 часа. Наблюдается резко выраженная текстура деформации. Об аморфизации структуры можно судить по отсутствию отражений от многих плоскостей. Исходные образцы оливина имели две фазы, отличающиеся по параметру « a » кристаллической структуры: первая – « a » = 4.760 Å и вторая – « a_1 » = 4.766 Å и « a_2 » = 4.677 Å.

Fig. 7. The bar-chart of X-ray reflections of the olivine crystal under loading after thermal treatment in the helium medium. hkl – indexes of reflection planes; $2Q$ – reflection angle; p – pressure of helium in the chamber. 1 – original sample. 2 – $p = 0.1$ МПа; uniaxial loading 44 МПа; implantation for 2 hours. The strain pattern is clearly visible. Amorphization of the structure is suggested by the absence of reflections from many planes. Original olivine samples had two phases with different values of a of the crystalline structure: $a = 4.760$ Å in the first phase, and $a_1 = 4.766$ Å and $a_2 = 4.677$ Å in the second phase.

щений происходит преимущественное сжатие пород. Увеличение скоростей прохождения сейсмических волн не является монотонным с глубиной. Об этом свидетельствуют данные по изменению скоростей сейсмических волн.

Сейчас можно с уверенностью говорить, что основным переменным фактором, действующим в верхней мантии, являются восходящие потоки легких газов, прежде всего водорода. За вариации скоростей продольных волн могут быть ответственны изменения концентрации подвижной водородной подрешетки при сохранении устойчивости каркаса кристаллической структуры.

4. АМОРФИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ В ВЕРХНЕЙ МАНТИИ И МЕЖБЛОКОВЫХ ПРОСЛОЙКАХ

Одной из основных реакций среды верхней мантии на действие атомов внедрения и давления является аморфизация структуры. Практически все атомы внедрения в большей или меньшей степени являются сильными аморфизаторами. Водород является наиболее сильным аморфизатором. Другие элементы, из-за невысокого коэффициента диффузии, оказывают локальное воздействие. В аморфных структурах координационные числа и межатомные расстояния как мини-

мум в первой координационной сфере неодинаковы для разных атомов. Однако за счет различных уравнивающих процессов макроскопические свойства становятся изотропными. При этом в аморфных структурах свободный объем будет большим, чем в кристаллических структурах. Эти свойства необходимо учитывать при анализе процессов в верхней мантии.

В условиях неравновесного состояния среды при прохождении через нее активных потоков водорода (гелия в существенно меньших количествах) и одновременного действия почти предельных напряжений можно говорить о синергетическом характере поведения системы. Здесь отражается тот факт, что при совместном действии каких-либо факторов на физическую систему (у нас геологическая среда) ее отклик может многократно возрастать, т.е. мы можем получить систему, параметры которой существенно отличаются от тех, которые мы предполагали и предполагаем (рис. 7). Мы имеем в виду аморфизацию структуры и ярко выраженную текстуру деформации.

Отметим что, аморфизация наблюдалась на горных материалах со значительным содержанием урана и тория [Morozova, Ashkenazi, 1971]. Это метамиктные минералы: силикаты и сложные окислы циркония, титана, урана и др. Такие минералы длительное время сохраняли высокий уровень аморфизации, связанный с диффузией гелия в структурах. Аморфизация фикси-

ровалась по размытости рефлексов на малых углах отражения и низкой плотности. Степень аморфизации зависела от возраста минералов. При этом нужно отметить, что изученные минералы длительное время находились при температурах, не превышающих 50 °С. Температурная обработка минералов приводила к быстрому восстановлению их кристаллической структуры. Очевидно, что долговременно сохраняемая аморфизация структуры метамиктных минералов обусловлена поддерживаемой радиоактивностью зоны за счет распада урана и тория, продуктами которых являются α -частицы.

Условия формирования и долговременной жизни верхней мантии указывают на аморфизацию ее структуры. Прямые измерения отсутствуют (лабораторное моделирование), однако косвенные признаки и опыт физического материаловедения указывают на ее существование и существенную роль в различных процессах. Следовательно, необходимо учитывать особенности физико-химических свойств аморфизированных структур по сравнению с кристаллическими. Такое сравнение можно сделать, учитывая данные известных материалов с аморфизированными структурами. Для аморфизированных структур модули сдвига и Юнга меньше на 30–50 %, чем аналогичные величины для кристаллических материалов. Коэффициенты Пуассона почти одинаковы. Неупругость аморфных материалов довольно высокая, что связано с отсутствием регулярности в расположении атомов в структуре. Атомы, находящиеся в неустойчивом положении, могут легко смещаться под действием внешних напряжений, в результате чего приложенное к аморфному материалу напряжение может частично релаксировать, а удлинение образцов не будет пропорциональным приложенному напряжению. Отметим другие удивительные данные. Отношение твердости к прочности на растяжение аморфных материалов близко к теоретической величине для идеально пластичных тел, не претерпевающих деформационное упрочнение. Отсюда аморфизированные структуры относят к высокопрочным [Sudzuki et al., 1987; Khachatryan, 1974].

При высоких давлениях в верхней мантии аморфные структуры должны быть относительно устойчивы, даже в граничных слоях. Аморфные структуры в геологической среде, как и известные металлические аморфизированные структуры, должны абсорбировать на 40–50 % водорода больше, чем кристаллические материалы. В аморфизированных материалах коэффициент диффузии несколько выше, чем в кристаллических структурах, и имеет сильную зависимость от концентрации водорода. С ростом концентрации водорода в аморфизированных структурах вначале идет заполнение позиций с наименьшей энергией и по мере заполнения глубоких потенциальных ям с ростом концентрации водорода происходит существенное увеличение эффективного коэффициента диффузии. Это связано также с тем, что с увеличением давления вы-

шележащей толщ L концентрация дефектов (вакансий) уменьшается в $\exp(-LV/kT)$ раз, где V – атомный объем. Среда в верхней мантии и глубже становится более «бездефектной», а субмикроскопическая пористость контролируется неупорядоченным расположением различных атомов в аморфизированной структуре.

Учитывая неоднородность химического состава верхней мантии и восходящих потоков элементов внедрения, можно говорить о том, что среда представляет собой двухфазную систему с различным **соотношением** упорядоченной (кристаллической) и неупорядоченной (аморфизированной) фаз, **которое ответственно** за своеобразное и уникальное формирование пространственных геологических структур. Следовательно, прослойки между упорядоченными и неупорядоченными фазами могут быть представлены наноструктурами, что также отразится в уникальных динамических свойствах системы. О каких пространственных структурах может идти речь?

Чередующиеся горизонтальные структуры с повышенными и пониженными скоростями. Заметим, что скорости упругих волн являются структурно-чувствительными параметрами, что позволяет фиксировать слоистые структуры верхней мантии, наклонные скоростные структуры зон субдукции, вариации параметров среды. Скорости зависят от физико-механических параметров, контролируемых типом структуры материала или среды: отношение скоростей продольных и поперечных волн $V_p/V_s \sim 1.15 (E/\mu)^{1/2}$, где E и μ – соответственно модули Юнга и сдвига. Коэффициент Пуассона здесь принят равным 0.3.

Насколько сложна скоростная структура верхней мантии можно видеть из рис. 8 [Tarakanov, 1987]. Постоянная скорость отмечается в широком диапазоне глубин, причем параметры скоростей различаются в соседних по глубине зонах, что указывает на один из основных действующих факторов, а именно – процесс аморфизации. Здесь также наиболее вероятно разное соотношение концентрации кристаллической и аморфной фаз. В то же время влияние на скоростные параметры водородной подрешетки, т.е. изменения концентрации водорода, с нашей точки зрения, является определяющим в большей степени, чем P – T параметры.

Тонкая структура скоростного поля фокальной области Камчатки для различных глубин показана на рис. 9. Здесь также видны резкие изменения скоростного поля, что может быть обусловлено различием в степени аморфизации в структуре среды, контролирующей скорости упругих волн. Такие свойства аморфизированных структур могут оказывать влияние на многие процессы в геологической среде. Нужно обратить внимание на то, что скорости на больших глубинах могут быть очень низкими, как и на малых глубинах – достаточно высокими. Естественно, что пространственные распределения скоростного поля меняются во времени и могут меняться достаточно быстро,

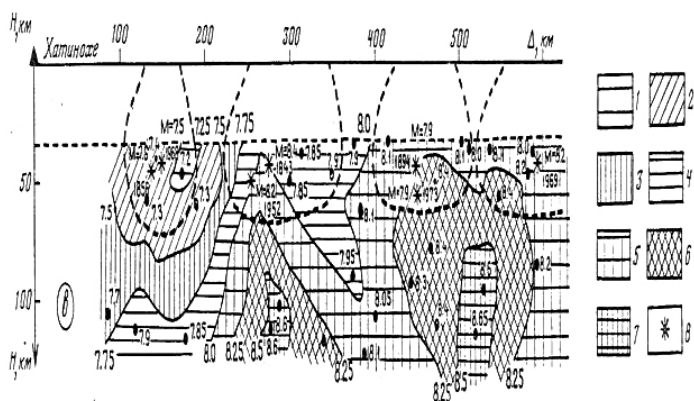


Рис. 8. Поля скоростей продольных волн (км/с) в фокальной зоне вдоль профиля станция Хатинохе – о-в Шикотан: 1 – < 7.25, 2 – 7.25 – 7.5, 3 – 7.51 – 7.75, 4 – 7.76 – 8.0, 5 – 8.01 – 8.25, 6 – 8.26 – 8.5, 7 – > 8.5; 8 – гипоцентры сильнейших землетрясений.

Fig. 8. Fields of P-wave velocities (km/sec) in the focal zone along the profile from Hatinoh Station to Shikotan Island: 1 – < 7.25, 2 – 7.25 – 7.5, 3 – 7.51 – 7.75; 4 – 7.76 – 8.0, 5 – 8.01 – 8.25, 6 – 8.26 – 8.50, 7 – > 8.5; 8 – hypocenters of the strongest earthquakes.

особенно после землетрясений [Slavina, Pivovarova, 2009]. И это хорошо известно. Отсюда следует важный вывод, который обычно не учитывается при мониторинге. Имплантация элементов внедрения в основные горные материалы не приводит к образованию новых фаз, наблюдаются лишь изменения объема различных элементов структуры, но эти изменения носят обратимый характер. Ранее было отмечено, что на глубинах выше границы Мохо имплантация проявляется в вариациях ОНС среды, которые носят разномасштабный характер, а ниже – в вариациях скоростей сейсмических волн на различных глубинах, вызванных изменением концентрации атомов внедрения. Очевидно, что газонасыщенная геологическая среда допускает проявление процессов, которые невозможны в других условиях.

Накопление атомов внедрения, прежде всего водорода и гелия, может происходить в аморфизированных структурах. Однако наибольшая концентрация легких газов может быть достигнута в граничных слоях упорядоченных и неупорядоченных (аморфизированных) структур. В результате при достигнутой плотности дислокаций, обусловленных несопряжением структур, около каждой дислокации может накапливаться до 100 атомов водорода на каждую атомную плоскость. Особенностью имплантации водорода является то, что водород не приводит к заживлению дефектов и не вводит новых дефектов. Это указывает дополнительно на обратимость процессов имплантации и «дегазации», поддерживающих эстафетный процесс передачи энергии снизу вверх.

Слоистая скоростная структура верхней мантии может быть объяснена, подчеркнем это еще раз, эстафетным процессом передачи энергии, причем можно

говорить, что зона пониженных скоростей в данный геологический период более аморфизированна, чем соседние по глубине зоны. В аморфизированной зоне легкие газы накапливаются и по мере достижения предельных концентраций происходит их сток. Из соседних по глубине зон происходит сток легких газов до следующей аморфизированной структуры.

Структура плюма на глубинах верхней мантии от 700 до 70–50 км. Мы не беремся обсуждать возможную структуру плюмов в нижней мантии и согласны с Ф.А. Летниковым [Letnikov, 2001] в том, что локализованные высокоэнергичные водородные струи в значительной мере формировали и продолжают формировать нынешний облик планеты, включая литосферу, и ее тепловую жизнь. Полагаем возможным говорить о структуре плюмов выше примерно 700 км, т.е. в зоне, в которой происходят глубокофокусные «землетрясения». В рамках изложенных представлений структура плюмов должна быть также аморфизированной. Эти представления отличаются от идеи сублимированного состояния плюма в нижней мантии [Letnikov, 2001]. Однако процессы, которые рассматривал в сублимированном плюме Ф.А. Летников, могут протекать и в аморфизированном плюме, где также существует свободный объем для экзотермических и эндотермических реакций с участием газовой фазы. Следовательно, наиболее активен будет массоперенос в граничных структурах аморфизированного плюма с окружающей матрицей. Плюм в наших представлениях – это локализованная зона интенсивной водородной дегазации. Однако интенсивность дегазации в плюме существенно меньше, чем в структурах зоны «субдукции», где отмечается сейсмичность по всей глубине (рис. 10). Поясним это ниже.

Структура зоны «субдукции». Очевидно, что условия проявления глубокофокусных «землетрясений» и периоды их повторяемости не укладываются в рамки механических представлений. Обратим внимание на распределение сейсмичности в зоне субдукции ниже уровня 30–50 км. Сейсмичность в большей или существенно в меньшей степени прослеживается по всей глубине профиля зоны субдукции. Крутизна профиля меняется, и его выполаживание наблюдается на максимальных глубинах, где происходит активизация сейсмичности. На отдельных отрезках глубин наблюдается активизация сейсмичности, привязанная к местам изменения наклона. Это области около 100, 200, 300–350 км. Сейсмический процесс развивается в граничных структурах фокальных зон, т.е. там, где деструкция и аморфизация структуры могут быть максимальными. Аморфизированность структуры зоны субдукции определяет ее основные особенности. Следовательно, сейсмический процесс должен иметь совершенно другие черты по сравнению с процессом в литосфере. Устойчивость аморфизированной структуры и отмеченные выше свойства могут способствовать легкому и медленному скольжению субдуцированной

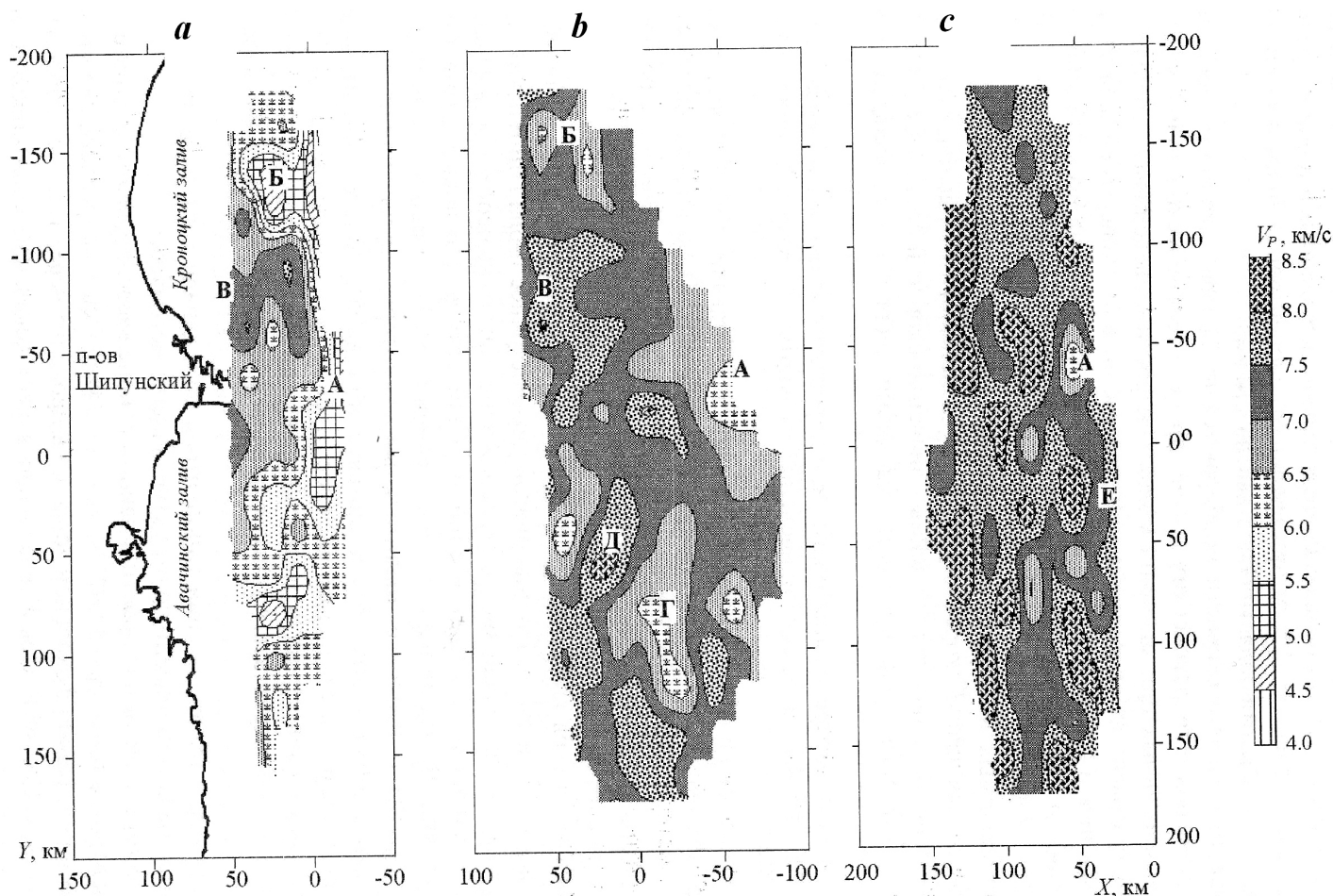


Рис. 9. Распределение скоростей продольных волн в горизонтальных сечениях на разных глубинах в фокальной зоне Камчатки, км: *a* – 5–35, *b* – 35–70, *c* – 70–200. Здесь представлены осредненные данные за несколько лет. Реальная ситуация с полем скоростей может меняться значительно быстрее, начиная от суточного интервала [Slavina, Pivovarova, 2009].

Fig. 9. Distribution of P-wave velocities in horizontal profiles at different depths in the Kamchatka focal zone: *a* – 5–35 km; *b* – 35–70 km; *c* – 70–200 km. The data are averaged for several years. The actual status of the field of wave velocities may change much faster, even on a daily basis [Slavina, Pivovarova, 2009].

плиты вдоль верхнего профиля, включая фокальную зону поверхностной коры (рис. 10). Верхняя граница субдуцирующей плиты на всей ее длине отмечена сейсмичностью. Повторяем, что это может быть очень медленное движение, сама аморфизированная структура, как отмечено выше, не позволит образовать протяженные зацепления или локальную блокировку. Отмеченное состояние среды в зоне верхнего профиля свидетельствует в пользу модели плитотектоники. Однако субдуцирующая плита реально должна быть ограничена устойчивой аморфизированной структурой и сейсмическим процессом с двух сторон. Нижняя же граница плиты проявляется по сейсмичности лишь с глубины около 70 км. Выше наблюдается область сейсмических событий, не отражающих какую-либо границу, т.е. субдуцирующая плита снизу не выделена. Где же тогда движущаяся океаническая плита [Balakina, 2002; Boldyrev, 2002; Gufeld, 2007]?

Приведем дополнительные данные. Так, например,

распределение плотности очагов землетрясений Камчатского региона носит сложный, но закономерный характер. За 40-летний период наблюдений показано, что распределение в пространстве активных и слабо-сейсмических участков устойчиво, причем сильнее события происходят в зонах повышенной активности слабых землетрясений, т.е. слабые события не снимают накапливаемые напряжения [Boldyrev, 2002]. Это указывает на протекание с определенной периодичностью вертикальных процессов переноса энергии в среде.

Другой пример. В ряде сейсмоактивных регионов обнаружены почти вертикальные, изометрические в плане, скопления гипоцентров, названные сейсмическими «гвоздями» или, в наших представлениях, литосферными плюмами. В работе [Vadkovsky, 2012] приводятся данные о формировании «гвоздя» начиная с 90 км. Эпицентральная проекция имеет диаметр 5–10 км. Время формирования «гвоздя» – от нескольких дней

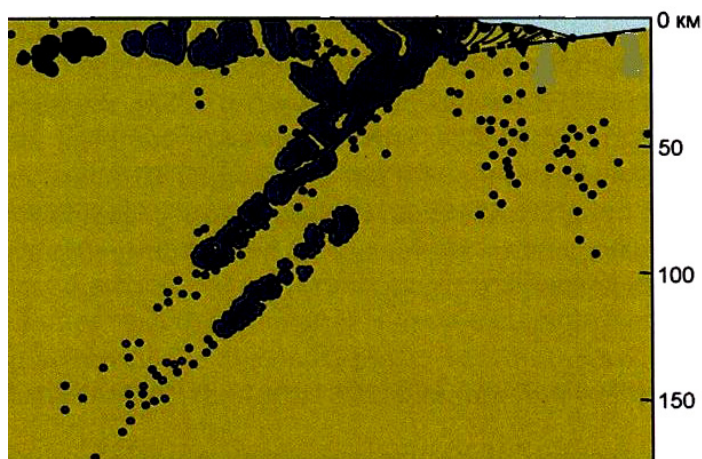


Рис. 10. Деструкционная структура зоны субдукции с непрерывной и долговременной сейсмичностью различного ранга [Tikhonov, Lomtev, 2011]. Темные пятна – сейсмические разрывы. «Субдуцирующая» плита ограничена одной фокальной зоной сейсмичности, эта зона аморфизированна, вдоль нее возможно скольжение. Однако до глубин 70 км граница плиты снизу не выделена.

Fig. 10. The strain pattern of the subduction zone characterized by continuous long-term seismicity of various ranks (according to [Tikhonov, Lomtev, 2011]). Dark spots – seismic fractures. The ‘subduction’ plate is bordered only by one seismic focal zone; this zone is amorphized, and sliding may occur along the zone. However, to the depth of 70 km, the border of the plate is not detected.

до месяца. Гипоцентры равномерно заполняют тело «гвоздя» в период его формирования (рис. 11). Отмечено, что такие скопления очагов не связаны с элементами разрывных структур и, следовательно, с действием тектонических сил. Предполагается, что «гвозди» инициированы поступлением глубинных «флюидов» [Vadkovsky, 2012; Shevchenko et al., 2011].

Естественно возникает вопрос о движущих силах сейсмического процесса в зоне субдукции. Необходимо учитывать, что «глубокофокусные разрывы» вызывают на поверхности квадрантное распределение первых вступлений сейсмической волны, а фазовые переходы с изменением объема невозможны. Тот же вопрос следует поставить для коровых землетрясений этой зоны (об этом речь пойдет ниже).

Какова может быть причина инициирования кажущихся «глубокофокусных разрывов» и быстрой «гвоздевой» сейсмичности? Очевидно, что наиболее активное взаимодействие со средой может быть связано с восходящими потоками водорода и уже подготовленными особенностями структуры. Нужно отметить, что у глубокофокусных событий отсутствуют афтершоки или их очень мало, т.е. это единично подготовленный акт. Его протеканию должно предшествовать накопление водорода в аморфизированной структуре и в сочленениях неупорядоченной и упорядоченной фаз. На возможность этой стадии указывает определенная периодичность глубокофокусных событий и вариации

скоростей сейсмических волн. По-видимому, на горизонтальных структурах и в отдельных зонах наклонных структур происходит непрерывный процесс накопления и стока водорода. В отличие от них на наклонных границах, где происходят непрерывные сейсмические явления, ситуация другая. Там может быть более высокой плотность водородного потока, существенно больший объем неупорядоченной фазы и, следовательно, нарушение непрерывности потока в отдельных зонах. Накопление в структуре водорода до предельной концентрации, т.е. до предельной растворимости, приведет к его быстрому стоку в вышележащие горизонты. Однако этот сток при экстремальных Р–Т параметрах может носить «взрывной» характер (см., например, работу Ф.А. Летникова [Letnikov, 2001]). Но это не взрыв. Аналог такого быстрого «струйного» процесса в почти нормальных условиях показан на рис. 2. Таким образом, под «очагом глубокофокусного разрыва» можно понимать область, в которой реализуется «струйный» (взрывной) выброс водорода из аморфизированной среды и формируется «сейсмическая» волна, т.е. сейсмическая волна связана с «взрывным» изменением концентрации водорода в структуре решетки. Есть основания для более детального рассмотрения процесса распада «глубокофокусного очага землетрясения».

Для каждой глубины устанавливается «равновесное» состояние, контролируемое Р–Т параметрами для твердой фазы. Этим параметрам соответствует равновесная концентрация водорода в аморфизированной структуре. Постепенное увеличение концентрации водорода до предельной занимает определенное инкубационное время. Последующий «взрывной» выброс водорода в вышележащие слои приведет к повышению температуры в этой зоне, так как процесс растворения является экзотермическим. Однако могут быть особенности дальнейшего развития процесса, обусловленного Р–Т параметрами среды по глубине верхней мантии, где превалирует действие температуры (до глубины 100–120 км) или давления (глубже 100–120 км).

Быстрый нагрев на глубинах до 100–120 км должен был бы привести к преобразованию аморфизированной структуры в упорядоченную и последующему возврату к равновесному аморфизированному состоянию. Излучение сейсмической энергии может вызываться обратимым фазовым переходом неупорядоченное (аморфизированное) – упорядоченное – неупорядоченное состояние. Однако из-за действия давления переход к упорядоченному состоянию невозможен. Можно условно говорить о переходе аморфизированной структуры в другую конфигурацию, отличающуюся от предыдущей. Излучение сейсмической энергии лучше связывать с обратимым «фазовым» переходом из возбужденного неупорядоченного состояния в исходное неупорядоченное состояние. При этом будет происходить «перестройка» структуры без изменения

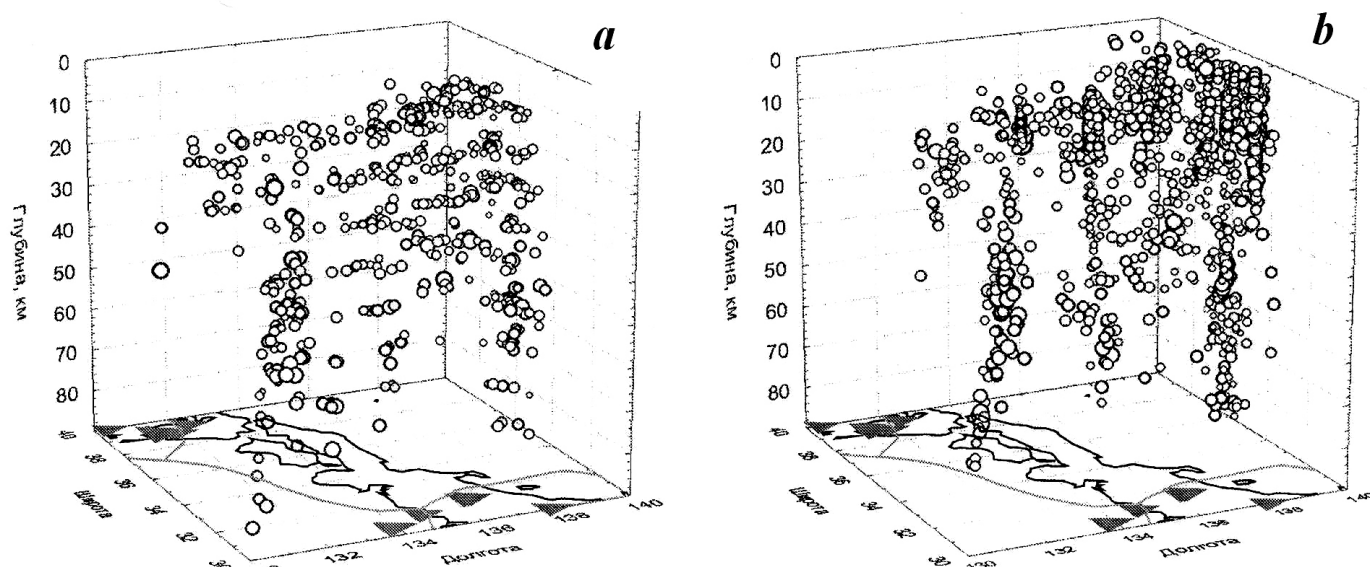


Рис. 11. Пространственные распределения гипоцентров землетрясений для области 30–40°с.ш. и 130–140° в.д. для интервала глубин 0–90 км. *a* – 1981 г., *b* – 1983 г. [Vadkovsky, 2012].

Fig. 11. Spatial distribution of earthquakes hypocenters in 30–40 N° and 130–140 E° areas. Depth interval from 0 to 90 km. *a* – 1981; *b* – 1983 [Vadkovsky, 2012].

общего объема, плотность атомов внедрения будет меняться скачкообразно вдоль направления выброса («взрывного» характера), направленного снизу вверх. Но распределение первых вступлений сейсмических волн на сети станций будет отражать не взрывной характер процесса, а линейно распределенный процесс взрывного (быстрого) перехода атомов внедрения из одних позиций в другие, вышележащие [Balakina, 2002; Balakina, Kislovskaya, 1975].

Структура зоны «гвоздя», по-видимому, также аморфизированна. Учитывая формирование пористого пространства и развитие трещиноватости выше границы Мохо, можно предполагать, что зона «гвоздя» находится на начальной стадии образования будущей разрывной структуры за счет взаимодействия среды с локализованным восходящим потоком водорода (см. рис. 2). Ниже границы Мохо зону «гвоздя» лучше представлять плюмом с аморфизированной структурой.

5. СТРУКТУРА ГРАНИЦ В ЛИТОСФЕРЕ

Граница Мохо. Эта граница, точнее слой, имеет уникальные свойства. Этот слой является переходным между упруготрещиноватым и вязкопластичным состоянием среды, что определяется Р–Т параметрами. В этой же зоне уже возможна разветвленная система газовых пор. Слой Мохо также в значительной мере может быть аморфизированным. Следовательно, в этом слое наиболее вероятно накопление легких газов и пе-

рераспределение части вертикального потока водорода и гелия в горизонтальный. Это способствует более равномерному выносу легких газов в атмосферу и гидросферу совместно с газовой фазой водяного пара и далее через твердую фазу и флюид к поверхности. При этом речь не может идти о водородной хрупкости среды, так как среда уже разрушена и не терпит перенапряжений [Gufeld, 2007]. Горизонтальный вынос водорода по границе (слою) Мохо и границам барьерного эффекта, а также вдоль наклонных разрывных структур может привести к активизации сейсмического процесса [Gufeld, Matveeva, 2011; Gufeld et al., 2011] или/и формированию углеводородных залежей в неожиданных зонах и больших масштабах.

Структура границ блоков в земной коре и сейсмический процесс. Хорошо известно движение блоков платформенных областей сейсмоактивных и асейсмичных регионов относительно друг друга. Хотя граничный слой может иметь в ширину сотни метров и более, перемещение блоков относительно друг друга осуществляется весьма долговременно по узкой прослойке, которая сильно раздроблена и текстурирована. По этим структурам осуществляется также динамический режим сдвига (сброса, взброса и т.д.). Присутствие восходящих потоков водорода в граничных структурах приведет к их деструкции и аморфизации. Особенностью граничных структур является их устойчивость. Следствием этого будет обеспечение граничных условий для устойчивого скольжения блоков в широком диапазоне Р–Т параметров (соответствующих глубин). В этих условиях инициирование динамических

процессов сдвига наиболее вероятно может быть связано с резким уменьшением коэффициента трения между блоками за счет дополнительной водородной деформации аморфизированных граничных слоев. Более того, известно, что водород существенно понижает поверхностную энергию (см., например [Kukushkin, 2003; Indeitsev, Osipov, 2011]), поэтому процесс образования трещин и ансамблей трещин, перерастающих в крупномасштабную подвижку вдоль граничной структуры, может протекать практически безбарьерно. Подобная ситуация может быть как для блоковой структуры платформенных зон, так и для коры выше границы Мохо в зонах «субдукции», поэтому любые аномалии полей за пределами соответствующих граничных структур не могут нести конкретной предостерегающей информации [Gufeld et al., 2011]. Возможным подтверждением этого является Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г., оказавшееся полностью неожиданным для сети долговременного мониторинга на расстоянии всего в 200 км, а также многолетний негативный опыт мониторинга сейсмической опасности.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования роли водородной дегазации в формировании структуры земных оболочек должны привлекать значительное внимание. Этот интерес диктуется многими практическими задачами, в решение которых заинтересована цивилизация. К ним относятся обоснование новых направлений поиска и разведки рудных и углеводородных месторождений и условий их формирования. Для геофизики особый интерес представляют

возможности реального прогноза сильнейших коровых землетрясений. При этом на первый план выдвигаются работы по краткосрочному прогнозу эпицентральной зоны с принципиально иной методологией, которую еще необходимо разработать. Это связано с тем, что переход из постоянного критического состояния (т.е. состояния непрерывного медленного движения блоков, которое поддерживается большую часть времени в коровом слое) в режим быстрого движения («крупномасштабные разрывы») может занимать короткое время. В чисто фундаментальном плане остаются непонятыми или нуждаются в серьезных дискуссиях проблемы формирования различных оболочек и граничных структур планеты, однако уровень наших экспериментальных возможностей будет еще долго недостаточным для осмысления всех вопросов. Именно поэтому мы полагаем необходимым сосредоточиться в настоящее время на изучении процессов в верхней мантии и литосфере, дегазация из которых в значительной мере контролирует процессы в зонах жизнедеятельности цивилизации. В основе этих работ может быть лабораторное моделирование материаловедческих аспектов проблем. Эти эксперименты будут достаточно сложными, но они уже сейчас технически реальны.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор искренне признателен и благодарен М.И. Матвеевой за обсуждения и дискуссии по всем затронутым проблемам, А.М. Кузину – за полезные замечания, А.В. Николаеву и С.И. Шерману – за внимание к работе и поддержку.

8. REFERENCES

- Adushkin V.V., An V.A., Kaazik P.B., Ovchinnikov V.M., 2001. Dynamic processes within the Earth's internal geospheres: Evidence from the seismic wave travel time data. *Doklady Earth Sciences* 381 (9), 1119–1121.
- An V.A., Lyuke E.I. 1992. Cyclic changes of parameters of seismic waves P in the Nevada-Borovoe route. *Fizika Zemli* 4, 20–31 (in Russian) [Ан В.А., Люкэ Е.И. Циклические изменения параметров сейсмической волны Р на трассе Невада-Боровое // *Физика Земли*. 1992. № 4. С. 20–31].
- Azbel I.Ya., Tolstikhin I.N., 1988. Radiogenic isotopes and the evolution of the Earth's mantle, crust and atmosphere. Apatity: Nauka, 140 p. (in Russian) [Азбель И.Я., Толстухин И.Н. Радиогенные изотопы и эволюция мантии Земли, коры и атмосферы. Апатиты: Наука, 1988. 140 с.].
- Balakina L.M., 2002. Subduction and earthquake focal mechanisms. In: *Controversial aspects of plate tectonics and possible alternatives*. UIPE RAS, Moscow, p. 120–141 (in Russian) [Балакина Л.М. Субдукция и механизмы очагов землетрясений // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 120–141].
- Balakina L.M., Kislovskaya V.V., 1975. Specific features of focal mechanisms of some deep earthquakes in the Okhotsk Sea. *Fizika Zemli* 8, 17–28 (in Russian) [Балакина Л.М., Кисловская В.В. Особенности механизма очага некоторых глубоких землетрясений в Охотском море // *Физика Земли*. 1975. № 8. С. 17–28].
- Boldyrev S.A., 2002. The effect of the lithospheric structure and properties on the seismic field of the Kamchatka region. *Izvestiya, Physics of the Earth* 38 (6), 447–468.
- Filatov S.K., 1987. Temperature equivalents for deformation of crystals, rocks and the Earth's shells. *Doklady AN SSSR* 296 (4), 955–959 (in Russian) [Филатов С.К. Эквиваленты по температуре для деформаций кристаллов, горных пород и земных оболочек // *Доклады АН СССР*. 1987. Т. 296. № 4. С. 955–959].
- Gamburtseva N.G., Lyuke E.I., Oreshin S.I., Pasechnik I.P., Rubinstein Kh.D., 1982. Periodic variations of dynamic parame-

- ters of seismic waves in the lithosphere tested by powerful explosions. *Doklady AN SSSR* 266 (6), 1349–1353 (in Russian) [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].
- Gilat A., Vol A., 2005. Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major source for internal terrestrial processes. *HAIT Journal of Science and Engineering B* 2 (1–2), 125–167.
- Gilat A., Vol A., 2012. Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geoscience Frontiers* (in press). <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.009>.
- Grigorian A.G., 2007. Local geomagnetic field variations of external origin: A case study of Armenia. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 43 (6), 524–552. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351307060109>.
- Gufeld I.L., 2007. Seismic process. In: Physical and Chemical Aspects. CNIIMASH, Korolev, 160 p. (in Russian) [Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс // Физико-химические аспекты. Королёв: ЦНИИМАШ, 2007. С. 160].
- Gufeld I.L., Gusev G.A., Matveeva M.I., 1998. Metastability of the lithosphere as a manifestation of upward diffusion of light gases. *Doklady Earth Sciences* 363 (8), 1111–1114.
- Gufeld I.L., Gusev G.A., Matveeva M.I., Lyutikov R.A., 1997. A radiation model of seismic process. *Journal of Earthquake Prediction Research* 6 (3), 333–356.
- Gufeld I.L., Matveeva M.I., 2011. Barrier effect of degassing and destruction of the Earth's crust. *Doklady Earth Sciences* 438 (1), 677–680. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X11050199>.
- Gufeld I.L., Matveeva M.I., Lyutikov R.A., Savin V.I., 1993. Radiogenic gases in the dynamics of the lithosphere. *Doklady AN* 328 (1), 39–42 (in Russian) [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].
- Gufeld I.L., Matveeva M.I., Novoselov O.N., 2011. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust. *Geodynamics & Tectonophysics* 2 (4), 378–415. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2011-2-4-0051>.
- Gusev G.A., Gufeld I.L., 2006. The seismic process in a geologic medium of extreme energy saturation and earthquake prediction. *Journal of Volcanology and Seismology* 6, 71–78 (in Russian) [Гусев Г.А., Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс в предельно энергонасыщенной геологической среде и прогноз землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. 71–78].
- Indeitsev D.A., Osipov E.V., 2011. A statistical model of formation of the hydride phase in hydrogenated metals under loading. *Doklady AN* 440 (4), 472–475 (in Russian) [Индейцев Д.А., Осипова Е.В. Статистическая модель образования гидридной фазы в наводороженных металлах под действием нагрузки // Доклады АН. 2011. Т. 440. № 4. С. 472–475].
- Khachatryan A.G., 1974. The theory of phase transitions and the structure of solid solutions. Nauka, Moscow, 384 p. (in Russian) [Хачатурян А.Г. Теория фазовых превращений и структура твердых растворов. М.: Наука, 1974. 384 с.].
- Klark S.P., 1969. Guidebook of Physical Constants of Rocks. Mir, Moscow, 543 p. (in Russian) [Кларк С.П. Справочник физических констант горных пород. М.: Мир, 1969. 543 с.].
- Kopnichen Yu.F., Sokolova I.N., 1997. On geodynamic processes associated with tandems of large earthquakes in Central and Southern Asia. In: Earthquake Prediction and Deep Geodynamics. Almaty, p. 83–91 (in Russian) [Копничев Ю.Ф., Соловова 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].
- Kopnichen Yu.F., Sokolova I.N., 2003. 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* 39 (7), 568–579.
- Kopnichen Yu.F., Sokolova I.N., 2011. Annular seismicity structures and the March 11, 2011, Earthquake (Mw=9.0) in Northeast Japan. *Doklady Earth Sciences* 440 (1), 1324–1328. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X11090194>.
- Kozlovsky E.A., 1984. The Kola Superdeep. Nedra, Moscow, 490 p. (in Russian) [Козловский Е.А. Кольская сверхглубокая. М.: Недра, 1984. 490 с.].
- Kukushkin S.A., 2003. Initial stages of brittle destruction of solids. *Uspekhi mekhaniki* 2 (2), 21–44 (in Russian) [Кукушкин С.А. Начальные стадии хрупкого разрушения твердых тел // Успехи механики. 2003. Т. 2. № 2. С. 21–44].
- Larin V.N., 1980. The hypothesis of the initially hydride Earth. Nedra, Moscow, 216 p. (in Russian) [Ларин В.Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. М.: Недра, 1980. 216 с.].
- Letnikov F.A., 2001. Super-deep fluid systems of the Earth and ore genesis problems. *Geology of ore deposits* 43 (4), 291–307 (in Russian) [Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 4. С. 291–307].
- Marakushev A.A., 1992. The Origin of the Earth and the Nature of its Endogenic Activity. Nauka, Moscow, 208 p. (in Russian) [Маракушев А.А. Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М.: Наука, 1992. 208 с.].
- Morozova I.M., Ashkenazi G.Sh., 1971. Migration of Rare Gas Atoms in Minerals. Nauka, Leningrad, 121 p. (in Russian) [Морозова И.М., Ашкенази Г.Ш. Миграция атомов редких газов в минералах. Л.: Наука, 1971. 121 с.].
- Nikolaevsky V.N., 1980. Dilatancy and the earthquake focus theory. *Uspekhi mekhaniki* 3 (1), 70–101 (in Russian) [Николаевский В.Н. Дилатансия и теория очага землетрясения // Успехи механики. 1980. Т. 3. № 1. С. 70–101].

- Nikolaevsky V.N., 1982. The Earth's crust, dilatancy and earthquakes. In: Mechanics of the Earthquake Foci. Mir, Moscow, p. 133–215 (in Russian) [Николаевский В.Н. Земная кора, дилатанция и землетрясения // Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. С. 133–215].
- Orlyonok V.V., 1985. The Physics and Dynamics of External Geospheres. Nedra, Moscow, 185 p. (in Russian) [Орленок В.В. Физика и динамика внешних геосфер. М.: Недра, 1985. 185 с.].
- Osika D.G., 1981. The Fluid Regime of Seismically Active Regions. Nauka, Moscow, 203 p. (in Russian) [Осика Д.Г. Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука, 1981. 203 с.].
- Pavlenkova N.I., 2001. The structure of the Earth's crust and the upper mantle and the deep material displacement mechanism. *Vestnik OGGGGRAN* 4 (19), 18 (in Russian) [Павленкова Н.И. Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества // Вестник ОГГГГР РАН. 2001. № 4 (19). 18 с.].
- Polikarpova L.A., Belavina Yu.F., Malinovsky A.A., Polikarpov A.M., 1995. Time regularities of distribution of deep earthquakes in the world in the period from 1963 to 1979. *Physics of the Earth*, 2, 28–39 (in Russian) [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].
- Pushcharovskii Yu.M., 2005. The Structure, Energy, and Tectonics of the Earth's Mantle. *Herald of the Russian Academy of Sciences* 75 (6), 579–586.
- Puzirev N.N., 1997. Methods and Objects of Seismic Studies. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 302 p. (in Russian) [Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 302 с.].
- Shevchenko V.I., Aref'ev S.S., Lukk A.A., 2011. Subvertical clusters of earthquake hypocenters unrelated to the tectonic structure of the Earth's crust. *Izvestiya, Physics of the Earth* 47 (4), 276–298. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351311030050>.
- Slavina L.B., Pivovarov N.B., 2009. The Dynamics of the Field of Seismic Waves in Periods of Seismic and Volcanic Activity in Kamchatka. IPE RAS, Moscow, 80 p. (in Russian) [Славина Л.Б., Пивоваров Н.Б. Динамика поля скоростей сейсмических волн в периоды сейсмической и вулканической активизации на Камчатке. М.: ИФЗ РАН, 2009. 80 с.].
- Stacey F., 1972. Physics of the Earth. Mir, Moscow, 342 p. (in Russian) [Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир, 1972. 342 с.].
- Sudzuki K., Fujimori H., Hakimoto K., 1987. Amorphous Metals. Metallurgy, Moscow, 328 p. (in Russian) [Судзуки К., Фудзимори Х., Хакимото К. Аморфные металлы. М.: Металлургия, 1987. 328 с.].
- Taranov R.Z., 1987. On the possible role of seismic focal zones in the formation and development of island arc structures. In: The Structure of Seismic Focal Zones. Nauka, Moscow, p. 11–28 (in Russian) [Таранов Р.З. О возможной роли сейсмофокальных зон в формировании и развитии структур островной дуги // Структура сейсмофокальных зон. М.: Наука, 1987. С. 11–28].
- Tikhonov I.N., Lomtev V.L., 2011. The Great Japan of March 11, 2011: tectonic and seismological aspects. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera* 10 (2), 49–66 (in Russian) [Тихонов И.Н., Ломтев В.Л. Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г.: тектонические и сейсмологические аспекты // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 2. С. 49–66.].
- Vadkovsky V.N., 2012. Subvertical clusters of earthquake hypocenters – 'seismic nails'. *Vestnik ONZ RAN* 4, NZ1001 (in Russian) [Вадковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – «сейсмические гвозди» // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. NZ1001]. <http://dx.doi.org/10.2205/2012NZ000110>.
- Voitov G.I., 1986. The chemistry and scales of the recent natural gas flow in various geostructural zones of the Earth. *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva* 31 (5), 533–540 (in Russian) [Войтов Г.И. Химизм и масштабы современного потока природных газов в различных геоструктурных зонах Земли // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1986. Т. 31. № 5. С. 533–540].



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

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