



УДК 550.4:551.2

## Глубинный флюид и процессы деструкции и флюидизации среды в литосферной мантии

Я. А. Рихтер

Рихтер Яков Андреевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, tyr2760@yahoo.com

К настоящему времени в полной мере выявилось значение геологических процессов, вызываемых активностью флюида в земной коре и в целом в литосфере Земли. В свете современных данных становится очевидной роль флюидных систем в передаче потоков энергии и вещества, а также формировании глубинных режимов литосферы, структур ее расслоения и разуплотнения. На основе флюидных систем возникают и развиваются все известные эндогенные системы в верхних горизонтах литосферы: магматические и метасоматические комплексы, гидротермально-магматические и гидротермально-метасоматические системы и связанные с ними рудные формации. Эти представления в полной мере согласуются с общетеоретическими положениями о глубинной эволюции Земли и дегазации ее недр. Они вполне подходят для обоснования эндогенного происхождения углеводородов (нефти и природного газа): на их основе установлены признаки принадлежности УВ нефтяно-гидротермальным системам и их парагенетическое соотношение с другими эндогенными гидротермальными системами. Это позволяет применить новый подход к решению старых проблем нефтяной геологии.

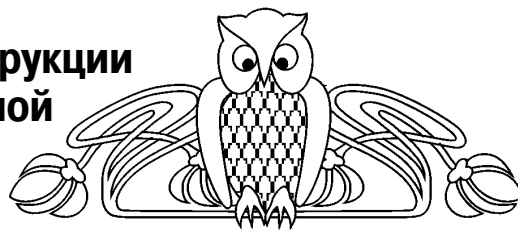
**Ключевые слова:** глубинный флюид, литосферная мантия, катаклаз, метасоматоз и аморфизация мантийных перидотитов, минералы флюидного происхождения.

### Deep Fluid and Processes of Destruction and Fluidization in the Lithospheric Mantle

Ya. A. Richter

Yakov A. Richter, <https://orcid.org/0000-0003-2511-8550>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., 410600 Saratov, Russia, tyr2760@yahoo.com

To date, the significance of geological processes induced by fluid activity in the crust and in the Earth's lithosphere in general has been fully revealed. The role of fluid systems in the energy and matter flow transfer, as well as in the formation of the lithospheric deep modes, its lamination and decompression structures, becomes apparent in the light of current data. All known endogenous systems in the upper horizons of the lithosphere originate and evolve on the fluid system basis: magmatic and metasomatic complexes, hydrothermal-magmatic and hydrothermal-metasomatic systems and associated ore formations. These ideas are fully consistent with the general theoretical provisions of the Earth deep evolution and its subsoil degassing. They are fully applicable to justification of the endogenous origin of hydrocarbons (oil and natural gas). Using these concepts it was demonstrated that HCs pertain to naphthide-hydrothermal systems and have paragenetic



relationship with other endogenous hydrothermal systems. This new approach can be used to solve the old problems of petroleum geology.

**Key words:** deep fluid, lithospheric mantle, cataclasis, metasomatism and amorphization of mantle peridotites, minerals of fluid origin.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-196-205>

В настоящее время становится все более очевидной роль глубинного флюида в геодинамике литосферы, а также формировании глубинных режимов литосферы, структур ее расслоения и разуплотнения.

Теоретические проблемы, связанные с присутствием глубинного флюида в мантийной литосфере, еще недостаточно ясны и требуют дальнейшей разработки. К ним можно отнести некоторые вопросы термодинамики взаимодействия флюида и вещества литосферы, дифференциации флюида и появления локальных флюидных систем разной «специализации». Но это несколько не умаляет значения уже полученных результатов в области флюидогеодинамики. В то же время, как представляется автору, многие уже известные факты, добытые в разных областях геологии, могут быть интерпретированы с позиций флюидодинамики, в частности это относится к явлениям глубинного метасоматоза, катаклаза и к расслоенному течению в альпинотипных перидотитовых массивах, представляющих тектонические оторженцы верхней мантии в земной коре. Новейшие данные по минералогии и геохимии глубинных включений мантийных перидотитов в кимберлитах позволяют оценивать состав флюида и условия его взаимодействия с веществом мантии. Анализ этого материала посвящен настоящий обзор современного состояния проблемы.

**Общая геодинамика недр планеты и роль глубинного флюида.** Геодинамика недр планеты в связи с появлением современной теории тектоники литосферных плит за последние полвека получила мощное развитие. В основу теоретических представлений о процессах, происходящих в недрах Земли, были положены универсальные идеи термодинамики, теории систем и синэнергетики, что позволило создать принципиально новые модели развития планеты. Стало возможным рассматривать вместе, во взаимодействии, как крупнейшие мегасистемы, литосферу, мантию и ядро Земли. На этой основе стали разрабатываться теории тепло- и массопереноса внутри них и обмена энергией и веществом между ними.



Передача тепла в ядре и мантии осуществляется общим конвективным и локальным плюмовым способами, в литосфере – общим кондуктивным и локальным расплавно-флюидным. При этом во многих мегасистемах активно участвует флюид как носитель тепла и реакционно-обменных компонентов вещества. На разном уровне слоя «D» (пограничного для внешней части ядра и нижней мантии планеты) и астеносферы (под литосферой в верхней мантии) формируются и перераспределяются наиболее мощные потоки флюидов. Внешнее жидкое ядро является открытой неравновесной нелинейной динамической системой [1, 2], в которой выделение теплоты происходит за счет внутреннего трения в ходе вращения планеты.

По представлениям Ф. А. Летникова, роль флюидов в процессах формирования литосферы в целом является определяющей. Литосфера Земли сформировалась в результате глобальной дегазации планеты, в ходе проявления которой из ее недр в верхние горизонты литосферы и за ее пределы были вынесены огромные массы вещества [3]. Главными и наиболее масштабными флюидосодержащими системами, отчетливо фиксирующимися геофизическими методами, являются астеносфера и внешнее жидкое ядро Земли. Именно они генерируют самые мощные потоки флюидов, на базе которых развиваются все эндогенные системы в верхних горизонтах литосферы. Как считает этот исследователь, в глубинных процессах при температуре выше 400° С флюиды представлены газовыми смесями. Они сжимаемы и поэтому в глубинных условиях могут достигать высокой плотности и являться уникальным высокоэнергетичным теплоносителем. Знание термодинамики и флюидного режима эндогенных процессов предполагает возможность выявления энергетических характеристик флюидных систем, выступающих в роли теплоносителя. Произведенные расчеты позволили получить оценку энергетических параметров глубинного флюида континентальной и океанической литосферы [4]. Теплосодержание флюида определялось по вкладу отдельных газов, не взаимодействующих друг с другом, начиная от глубины 200 км и затем вверх по изотерме через интервалы, кратные 20 км, путем расчета величин относительного приращения энтальпии (в кДж/г). Ф. А. Летников получил распределение по относительной величине этого параметра для выбранных газов и выделил среди них три группы: высокоэнергетичные со вкладом от 5 до 26% (H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, HCl, CO), среднеэнергетичные с долей 3,0–4,1% (H<sub>2</sub>O, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>) и малоэнергетичные с долей 1,6–3,5% (CO<sub>2</sub>, HF, F<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SiF<sub>4</sub>, SiCl<sub>4</sub>). Основной вклад в тепловой баланс глубинного флюида как в океанической, так и в континентальной литосфере вносят первые шесть видов газа так называемые восстановленные (от 59 до 63,5%).

Таким образом, становится ясной роль этих газов, возможных компонентов глубинного флюи-

да как основных носителей его энергии. Среди них первое место занимает молекулярной водород, доля которого достигает 15–25% на разных глубинах в пределах верхних 200 км. Напротив, фугитивность кислорода с глубиной резко падает, что свидетельствует о переходе к восстановительным условиям среды. Этот вывод оказался основополагающим для дальнейшего развития представлений о глобальной роли теплопереноса с помощью восстановленного флюида из нижней мантии и жидкого ядра планеты [5]. Источником водорода может являться внешнее жидкое ядро металлического состава (сплав железа, никеля, близкий к метеоритному железу), в котором под сверхвысоким давлением в громадном количестве растворен атомарный водород. Образование гидридов металлов, и в первую очередь железа, представляется вполне вероятным и предполагалось многими современными исследователями, учитывающими роль общепланетарного процесса дегазации недр планеты. Известные данные о реологии внешнего ядра при необходимых на соответствующей глубине температурах и давлении этому не противоречат.

Ф. А. Летников [5] сделал вывод о неизбежном выделении теплоты за счет сил трения внутри вращающегося расслоенного жидкого ядра с разной относительной скоростью вращения и различной динамической вязкостью и предложил принципиально новую модель генерации в жидком ядре Земли тепловой энергии и ее носителя – сверхглубинного флюида. Генерация тепла и сверхглубинного флюида приводит к взрывам с выбросом плюмов и суперплюмов, внедряющихся в нижнюю мантию. Такие плюмы обладают высоким энергетическим потенциалом (давление флюида более 1300 кбар, температура выше 4000° С) и при своем восхождении как бы «прожигают» мантию, достигая уровня астеносферы и создавая очаговые зоны плавления в вышележащей литосфере.

Все отмеченное выше, с нашей точки зрения, не отменяет первенствующего значения основного процесса теплопереноса внутри планеты – конвекции, имеющей общепланетарное развитие и в целом сохраняющей стационарный характер. Появление плюмов и суперплюмов лишь дополняет картину, представляя собой нарушение стационарности процесса конвекции. Причина такой перемены для планетарной мегасистемы может заключаться в недостаточной способности конвектирующей мантии отводить генерируемое в жидком ядре тепло, что приводит к его накоплению и «мгновенному» взрывоподобному выбросу в мантию вместе с накопившейся в ядре газовой фазой. Существенно водородный состав этой фазы определяет первоначальный состав сверхглубинного флюида. Его взаимодействие с матрицей вещества мантии, по Ф. А. Летникову [5], должно приводить к сублимации ее компонентов в газовую фазу. При этом возможны и



чисто химические реакции водородного флюида с кислородсодержащим веществом силикатной мантии, что приведет к экзотермическим эффектам, сопровождающим появление воды. В результате водородный флюид превращается в пар (водно)-водородный, содержащий в газовой фазе растворенные летучие соединения многих компонентов вещества мантии. Рост содержания паров  $H_2O$ , особенно в головной части поднимающегося плюма, приводит в обстановке верхней мантии к созданию условий для плавления ее субстрата. В целом для верхней мантии такая обстановка реализуется на определенном уровне ее разреза, в частности в так называемой астеносфере, благодаря конвективному выносу тепла. Заметим также, что конвекция как механизм теплопереноса внутри мантии ответственна за происходящие в литосфере процессы эндогенной геодинамики. Вклад плюмов и суперплюмов, достигающих уровня астеносферы, может рассматриваться в первую очередь как энергетический. Он также велик, хотя и несоизмерим с процессами метасоматоза и плавления, вызываемыми конвективным выносом тепла на уровень астеносферы. Плюмы, благодаря процессам плавления, сфокусированным над их «головами», проявляются в литосфере и земной коре локально, как «горячие точки и пятна», фиксирующие на поверхности проявления глубинного магматизма.

**Геофизические сведения о состоянии среды в литосфере.** Наиболее важными для суждения о состоянии вещества литосферной части верхней мантии являются данные сейсмопрофилирования МОГТ и КМПВ, а также сейсмической томографии и глубинного электромагнитного зондирования. В отличие от земной коры, как показали исследования последних 15–20 лет, скорость сейсмических волн в верхней мантии мало зависит от ее состава. Наблюдаемое изменение скорости сейсмических волн определяется другими факторами, в первую очередь параметрами термодинамического режима, напряженным состоянием среды, изменчивостью этого состояния и механических свойств субстрата. В частности, они указывают на существование на определенном уровне областей разуплотнения – так называемых волноводов. Наиболее вероятным объяснением снижения скорости сейсмических колебаний в этих областях является соответствующее уменьшение плотности, связанное с появлением пор и их насыщенностью флюидом. Как известно, флюиды меняют свойства вещества [6, 7]; насыщение ими может приводить к более раннему частичному (парциальному) плавлению вещества. Как становится ясно теперь, миграция флюидов и их концентрация на определенном уровне в мантии способствуют развитию деформаций пластического течения и метасоматическим преобразованиям в породах мантии.

Предположения о флюидонасыщенных волноводах подкрепляются данными электромаг-

нитных исследований. В обобщенной глобальной модели литосферы континентов выделен слой повышенной проводимости на глубине около 100 км, т. е. на уровне сейсмического волновода [8]. Этот волновод представлен «пачкой» чередования зон с повышенной и пониженной сейсмической скоростью. Предполагается, что такие «расслоенные пачки» сформированы за счет повышенной концентрации флюида на некотором уровне глубин, где происходит разуплотнение пород и растет их проницаемость под действием поднимающегося потока тепла [9].

Для границ, представленных такими «пачками», оказалась характерной большая амплитуда многофазовых отраженных волн, что удалось объяснить, как и понижение скорости, повышенной концентрацией флюидов под малопроницаемыми высокоскоростными экранами («покрышками»). Такая природа выделенных мантийных границ предполагается и для большой глубины, вплоть до подошвы верхней мантии. При этом считается, что описанные сейсмические границы сформировались в области концентрации глубинных флюидов под малопроницаемыми «покрышками» [10].

Весьма важную информацию о процессах в мантии дало изучение вариаций времен пробега продольных сейсмических волн на ряде планетарных трасс, а также временных вариаций в распределении сейсмических событий в очаговых зонах сильнейших землетрясений. Выявлены колебательный характер изменения скоростей продольных волн и ритмичность глубоководных землетрясений с близкими значениями периодичности – порядка 6–7 и 9–11 лет для первых [11] и 7–9 и 12–14 лет для вторых [12]. По геологическим меркам эти времена отражают достаточно быстрые процессы. Динамика их проявления может свидетельствовать об активном участии в них потоков глубинного флюида.

В последние годы был получен большой объем данных о пространственно-временных вариациях поперечных волн в очаговых зонах сильнейших землетрясений в Центральной Азии [13–15]. Было показано существование узких субвертикальных каналов высокого поглощения  $S$ -волн (от нижней коры до глубины около 100 км) в очаговых зонах сильных землетрясений на Тянь-Шане и Кавказе. 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  $S$ -волн на глубине 45–180 км. В будущей очаговой области сильное поглощение  $S$ -волн наблюдалось на глубинах 40–125 км. В первые месяцы после землетрясения в области очаговой зоны получено промежуточное поглощение  $S$ -волн на глубине 20–200 км. Через семь лет поглощение  $S$ -волн существенно уменьшилось на глубинах 20–90 км,



но выросло на глубине 90–170 км. Было также показано, что в течение 25–30 лет после сильных землетрясений на Тянь-Шане резко уменьшается поглощение *S*-волн в верхней мантии и одновременно увеличивается поглощение в нижней коре. Авторами [13–15] был сделан вывод, что быстрые (в геологическом масштабе времени) вариации поля поглощения *S*-волн однозначно свидетельствуют о подъеме мантийных флюидов в земную кору.

Как считает И. Л. Гуфельд [Gufeld], «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» [16, с. 427].

Что же создают эти потоки в среде верхней мантии, как они «работают»? Приходя из областей более высокого геостатического давления и распространяясь с помощью диффузии в межузловых пространствах кристаллической решетки, потоки «атомов внедрения» направленно (сфокусированно) воздействуют и занимают в ней максимально возможное при прочих равных условиях число позиций (вакансий). Одной из основных реакций среды верхней мантии на действие атомов внедрения и давления оказывается аморфизация структуры вещества [16]. Водород и гелий благодаря самым высоким коэффициентам диффузии являются наиболее сильными «аморфизаторами». В новых аморфных структурах координационные числа и межатомные расстояния, как минимум, в первой координационной сфере неодинаковы и беспорядочно распределены для разных атомов. Однако за счет компенсирующих процессов (деформационных в первую очередь, например трансляционных сдвигов кристаллической решетки и пр.) среда в макроскопическом плане становится уравновешенно-изотропной и насыщенной флюидом, занимающим свободный объем в аморфных структурах. Для аморфизованных структур модули сдвига и Юнга меньше на 30–50%, чем для кристаллических веществ. Значения коэффициента Пуассона почти одинаковы. Неупругость аморфных материалов довольно высокая, что связано с отсутствием регулярности в расположении атомов в структуре, поэтому растет роль пластических деформаций. При этом, как это ни парадоксально, происходит упрочнение материала [16]. Следовательно, при высоком давлении в верхней мантии аморфные структуры должны быть относительно устойчивы даже в граничных слоях. Аморфные структуры в геологической среде, как и известные металлические аморфизованные структуры, должны абсорбировать на 40–50% водорода больше, чем кристаллические материалы. В аморфизованных материалах коэффициент диффузии несколько выше, чем в

кристаллических структурах, и сильно зависит от концентрации водорода. С ростом концентрации водорода в аморфизованных структурах вначале идет заполнение позиций с наименьшей энергией. По мере заполнения глубоких потенциальных ям с увеличением концентрации водорода происходит существенное повышение эффективного коэффициента диффузии.

Выявленные в верхней мантии чередующиеся горизонтальные («слоистые») структуры с повышенной и пониженной скоростью сейсмических волн находят объяснение с этих позиций. Зонам пониженной скорости соответствуют области относительно высокой аморфизации вещества, зонам повышенной скорости – области с преобладанием кристаллической фазы. В существенно аморфизованной области накапливается флюид, затем происходит его сток в вышерасположенные аморфизованные структуры.

**Экспериментальные данные.** Лабораторное моделирование разрушения образцов при имплантации в них водорода и гелия подтвердило реальность предполагаемой деструкции среды [17]. За счет газовой фазы и взаимодействия водорода и гелия с твердой фазой, а также действия внешнего давления и температуры среда становится глубоко текстурированной и раздробленной. Как известно, общая трещиноватость и раздробленность свойственны породам земной коры вплоть до границы Мохо. Опытами установлено, что формирование трещиноватости связано с процессами образования газовых пор и их цепочек. При этом достигается такое давление газа в порах, которое вызывает образование трещин вокруг них. Общим следствием внедрения легких газов в различные материалы может быть создание внутреннего напряженного состояния, проявляющегося в эффектах ползучести и изменения объема (1–6%). Такие эффекты наблюдались при лабораторном моделировании, когда при насыщении гелием кристаллов оливина и пироксена в них создавались дефектные структуры и дислокационные структуры «струйного течения».

Таким образом, экспериментальные данные позволяют объяснить вариации объемно-напряженного состояния среды и ее деструкцию как результат реакции среды на воздействие восходящих потоков флюида. Эти вариации напряженного состояния среды, в том числе быстрые, фактически контролируются «газовым дыханием Земли», а не медленными тектоническими движениями [18], влияя, тем самым, на движение и фильтрацию флюидной фазы. За счет модуляции восходящих потоков легких газов и барьерного эффекта по глубине устанавливается динамическое чередование зон сжатия и растяжения. Эти напряжения должны сменять друг друга во времени, создавая в среде режим деформационной волны, распространяющейся в направлении флюидного потока.

**Полевые петрологические и структурные наблюдения.** Изучение текстур и структур



мантйных перидотитов офиолитовых массивов Омана [19], Джозефина в оregonских [20] и Мюррей Ридж в канадских Кордильерах [21], а также Войкаро-Сыннинского офиолитового массива на Полярном Урале [22] позволило выявить последовательность этапов развития деформаций общего пластического течения и последующих локальных сколово-сдвиговых деформаций вдоль сети возникающих трещин. На первом этапе господствовали пластические деформации и не возникало фиксированных открытых каналов проникновения магм или флюида. В ходе пластических деформаций дифференциальное перемещение вещества матрицы осуществлялось в субсолидусном твердопластичном состоянии путем трансляционного скольжения внутри кристаллической решетки оливина, при этом в макромасштабе возникали полосчатая текстура и подчиненные ей послойные дисгармонические складки течения. Следы ранних складчатых дислокаций сохранились не повсеместно, так как зачастую они «стерты» позднейшими деформациями. Тем не менее устанавливается, что оси минимального сжатия в полях развития складок, совпадающие с направлением пластического течения, были субгоризонтальными.

На втором этапе в мантйных перидотитах возникали новая полосчатость и крупные складки вязкопластического течения, ориентированные субвертикально, что вызвано поднятием мантйного вещества, возможно, находящегося в составе плюмов. Эти складки прослеживаются благодаря полосчатым текстурам и данным микроструктурного анализа линейно-плоскостных элементов в перидотитах и дунитах. Статистически преобладающие ориентировки кристаллов оливина обусловлены главным образом трансляционным скольжением дислокаций в кристаллических решетках и динамической рекристаллизацией. Показано, что и гарцбургиты, и дуниты испытали общие «проникающие» (penetrative) деформации [22]. Эти деформации фиксируются на микроструктурных диаграммах по максимумам сосредоточения ориентировок оптических осей Ng оливина, особенно четким в дунитах. На этом основании предположено, что текстуры пластического течения гарцбургитов и сетка сколовых трещин формировались в единой деформационной системе. Однако говорить о синхронности тех и других деформаций затруднительно, и скорее всего, сколовые деформации являются более поздними, локализуясь в замках и вдоль шарниров складок пластического течения. Оси минимального сжатия при формировании таких складок были субвертикальными (на это указывают и крутые углы наклона линейности, маркирующей направление пластического течения). По другому выглядит ориентировка главных осей напряжения на диаграммах для сколовых трещин и дунитовых тел: оси минимального и максимального сжатия расположены субгоризонтально. Это несоответ-

ствие полей напряжений позволяет предполагать развитие сколово-сдвиговых деформаций как более поздних и наложенных на пластические деформации.

Зоны наибольших градиентов напряжений локализовались вдоль осевых плоскостей складок, что приводило к появлению сдвигово-сколовых деформаций в виде системы трещин и развитию катакластических структур в гарцбургитах. Быстрая разрядка напряжений обуславливала образование ослабленных зон с повышенной проницаемостью для глубинного флюида. Вдоль плоскостей сдвига в зонах повышенной трещиноватости и проницаемости под действием флюида формировались синтетектонические тела дунитов, реститовая природа которых очевидна. На определенном уровне в верхней мантии миграция флюида приобретала сфокусированный характер, обусловленный градиентом давления в поровой среде недеформированных гарцбургитов (где возможна лишь диффузия), а также и в зонах повышенной трещиноватости и инфильтрации флюида вдоль границ катакластических зерен в деформированных гарцбургитах.

Фрагменты жил и даек дунитов интерпретируются как реликты каналов движения расплавов сквозь мантйные гарцбургиты [20–22]. Однако следов какого-либо взаимодействия вдоль каналов движения расплавов нигде не было установлено. Отсюда сделан вывод, что это может быть лишь в случае изолированности каналов, по которым поступали расплавы, от вещества мантии [23]. Согласно принятым представлениям, подъем магм в литосферной верхней мантии осуществляется по каналам, химически изолированным от вещества окружающей гарцбургитовой мантии. Считается, что расплавы, образовавшиеся в равновесии с перидотитами мантии при высоком давлении (на глубинах более 30 км), при более низком давлении насыщены только в отношении оливина и хромшпинелида и сильно недосыщены в отношении ортопироксена и, следовательно, должны вступать в реакцию с гарцбургитами, чтобы система пришла к новому равновесию. Эти представления поддерживаются большинством петрологов, исходящих из признания определяющей роли магм и магматических процессов в верхней мантии, в том числе и отечественными [22]. Образование и действие в мантии таких «химически изолированных» каналов объясняется быстрым поступлением магмы по открытым трещинам, появившимся под гидравлическим воздействием, и медленным подъемом расплавов, происходящим при поровом течении по «дунитовым каналам с высокой пористостью» [23, с. 25].

С нашей точки зрения, второй механизм более приемлем, так как соответствует наблюдаемым соотношениям. По-существу, это механизм метасоматоза, осуществляемого при диффузионно-инфильтрационном движении флюида. Получается странное несоответствие: на месте продвижения



магмы (предположительно дунитовой, что требует доказательств) вместо ожидаемых габброидов и их производных находятся исключительно дунитовые тела, а также связанные с ними жильные тела диопсидитов и других пироксенитов. Этот парадокс снимается, если принять, что ослабленные среди гарцбургитов трещинные структуры служили каналами не для магматических расплавов, а для глубинных флюидов. Главным процессом, преобразующим породы верхней мантии, является метасоматоз.

Итак, мы получаем основание для предположения, что ведущую роль в процессах петрогенезиса в верхней мантии играют глубинные флюиды. Возможно, расплавы, возникающие в астеносфере при парциальном плавлении вещества мантии, обладают свойствами флюида и на первых порах своего существования выступают как активные агенты метасоматоза при взаимодействии с мантийными перидотитами. Недаром многие исследователи петрологии мантийных пород идентифицируют эти агенты как «растворы-расплавы» или «расплавы-флюиды». В частности, [20] предполагали, что формирование дунитов вдоль ослабленных сдвиговых зон (*shear zones*) происходило благодаря фокусированной миграции расплава (обусловленной градиентом давления между материалом мантии внутри и вне этих зон) и быстрой его инфильтрации вдоль границ зерен в тектоните самой зоны. В деплетирован-

ных гарцбургитах хр. Мюррей Ридж в Канадских Кордильерах сохранились следы неоднократного синкинематического прохождения (воздействия) «раствора-расплава» сквозь реститы вдоль сети ослабленных зон, где дунитовые тела заместили гарцбургиты [21]. Важно отметить, что в пределах этих зон гарцбургиты в большинстве изученных примеров были превращены в тектониты с бластокатакластической и бластомилонитовой структурой, в некоторых случаях замаскированной более грубозернистой гранобластовой структурой.

**Ксенолиты деформированных мантийных пород в кимберлитах.** Другим объектом изучения являются ксенолиты мантийных пород в кимберлитах, причем особый интерес представляют так называемые деформированные перидотиты, обычно наиболее многочисленные и широко распространенные в разных регионах мира. Вероятно, эти породы представляют собой наиболее глубинное мантийное вещество, которое выносятся на поверхность кимберлитовыми расплавами [24, 25]. Установленные существенные вариации глубины залегания позволяют предполагать достаточно широкое их распространение в верхней мантии. Деформированные гранатовые перидотиты являются довольно распространенными ксенолитами среди неизменных кимберлитов трубки Удачная-Восточная (Якутия), где составляя не менее 30% от общего числа мантийных пород (рис. 1).

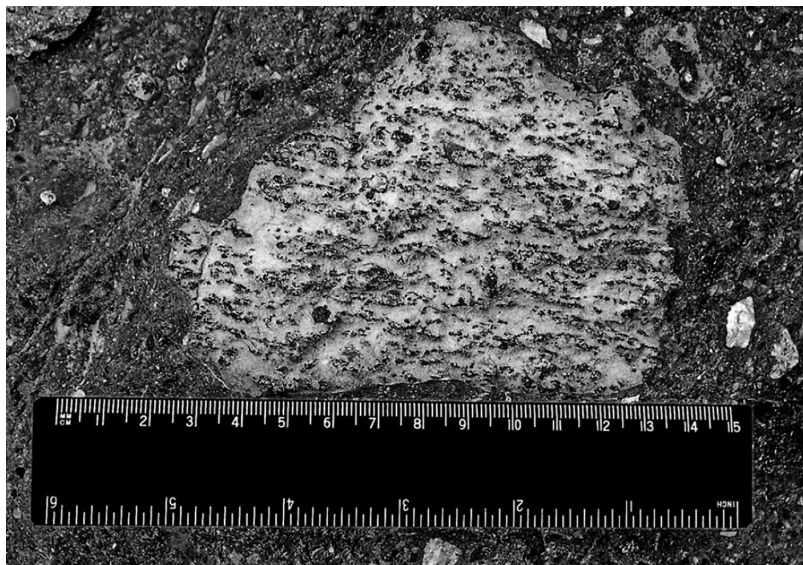


Рис. 1. Ксенолит деформированного лерцолита в неизменном кимберлите трубки Удачная-Восточная [26]

Для ксенолитов из трубки Удачная-Восточная интервал глубины определен в границах 170–220 км. Температура и давление последнего равновесия деформированных лерцолитов составляют 1225–1370° С и 60–73 кбар соответственно. *PT*-параметры, рассчитанные с использованием геобарометра MacGregor и геотермометра

Finnerty-Boyd, варьируют в пределах:  $P = 61.5\text{--}70.5$  кбар и  $T = 1225\text{--}1370^\circ\text{C}$  [26].

Петрографическое изучение деформированных гранатовых лерцолитов из трубки Удачная-Восточная показало, что эти породы имеют порфирокластическую и мозаично-порфирокластическую структуры (рис. 2). Порфирокласты



принадлежат оливину, орто- и клинопироксену, а также гранату. Порфирикласты оливина составляют в порфирикластических лерцолитах более 10% (в 8 образцах), а в мозаично-порфирикластических разностях (в 14 образцах) – менее 10% от всего оливина. По существу, деформированные гранатовые лерцолиты представляют собой в той или иной степени катаклазированные породы и настоящие катаклазиты. Характерно появление трещин дробления в порфирикластах. Катакластический матрикс этих пород состоит из агрегата мелких и мельчайших зерен (от 0,2 до 0,01 мм) оливина и, возможно, других первичных минералов. В него погружены порфирикласты оливина, орто- и клинопироксена, граната. В некоторых образцах и шлифах заметна преобладающая ориентированность отдельных

порфирикласт и их групп в одном направлении. Доля катакластического матрикса составляет примерно от четверти до половины объема породы. Интересно, что в некоторых образцах вдоль трещинок в порфирикластах и катакластическом матриксе отчетливо наблюдается сульфидная минерализация (см. рис. 2, а).

Материалы, касающиеся первичного состава глубинных (мантийных) флюидов, достаточно разнородны и в целом малочисленны. В первую очередь они могут быть получены при анализе некоторых минералов ультраосновных и щелочных пород, мантийное происхождение которых представляется несомненным. Это ксенолиты мантийных пород в кимберлитах, а также щелочно-ультраосновные и карбонатитовые породы сложных магматических комплексов. В составе

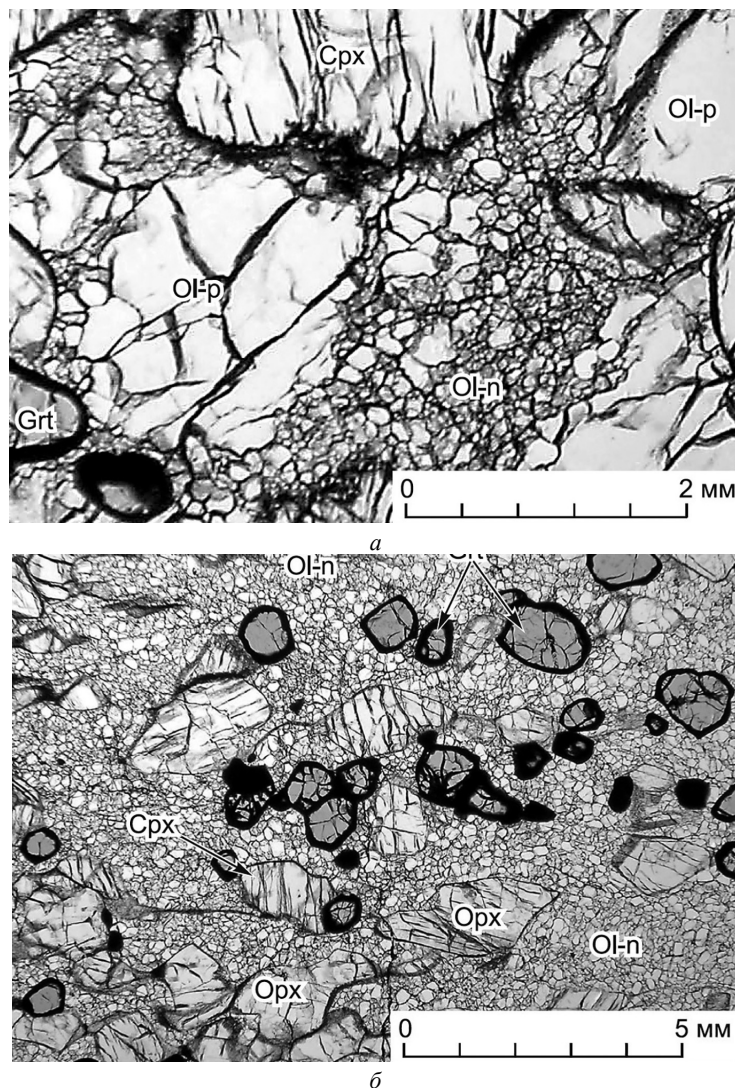


Рис. 2. Лерцолит с порфирикластической структурой, демонстрирующей взаимоотношения двух типов породообразующего оливина: а – крупные ксеноморфные выделения – порфирикласты и мелкие полигональные зерна – необласты катакластического матрикса; тр. Удачная-Восточная, обр. UV-6/05; б – лерцолит с мозаично-порфирикластической структурой; тр. Удачная-Восточная, обр. UV-34/03. Фото в проходящем свете [26]





этих пород и минералов обнаружено присутствие  $\text{CO}_2$ ,  $\text{OH}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{P}$ , а также щелочных элементов  $\text{K}$  и  $\text{Na}$ . Эти элементы и их соединения считаются компонентами, входящими в состав глубинных флюидов.

В мантийных ксенолитах к числу минералов-индикаторов глубинных флюидов могут быть отнесены: силикаты – флогопит  $\text{KMg}_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{F},\text{OH})_2$ , гумит  $\text{Mg}_7[\text{SiO}_4]_3(\text{F},\text{OH})_2$ ; фосфаты – апатит  $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F},\text{OH})_2$ ; сульфиды – пирротин  $\text{Fe}_9\text{S}_{n+1}$ , пентландит  $\text{Fe}_4\text{Ni}_4(\text{Co},\text{Ni},\text{Fe})_{0-1}\text{S}_8$ , расвумит  $\text{KFe}_2\text{S}_3$  и джерфшерит  $\text{K}_6\text{Na}(\text{Fe},\text{Ni},\text{Cu})_{24}\text{S}_{26}\text{Cl}$ ; карбонаты – кальцит  $\text{CaCO}_3$ , доломит  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , шортит  $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{CO}_3)_3$  и земкорит  $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ ; хлориды – галит  $\text{NaCl}$  и сильвин  $\text{KCl}$ ; сульфаты – афтиталит  $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$  [26].

Из сульфидов особенно интересен джерфшерит – весьма распространенный акцессорный минерал в ксенолитах гранатовых лерцолитов из кимберлитов, – а также обычный минерал щелочно-ультраосновных и карбонатитовых пород сложных магматических комплексов. В мантийных ксенолитах и ксенокристаллах образование джерфшерита в основном связывается с замещением и обрастанием первичных  $\text{Fe-Ni-Cu}$ -сульфидов в результате воздействия обогащенного калием и хлором гипотетического расплава-флюида. Однако состав и источник этого расплава-флюида, а также время и  $P$ - $T$ -параметры его взаимодействия с мантийными породами не определены. О возможности существования в мантийных условиях таких расплавов-флюидов свидетельствуют известные находки микровключений в алмазах со значительным содержанием щелочей и хлора [27].

Присутствие джерфшерита было установлено во многих кимберлитовых трубках Якутии – от трубки Мир на юге (на правом берегу р. Виллой) до Куойкского поля на севере (в нижнем течении р. Оленёк). В последние годы появились новые важные данные, уточняющие условия, время и место появления этого минерала в верхней мантии. Эти данные получены при детальном изучении выделений джерфшерита в образцах гранатовых деформированных перидотитов, отобранных из глубинных мантийных ксенолитов среди кимберлитов трубки Удачная-Восточная в Якутии [26]. В отличие от большинства кимберлитов мира изученные породы практически не затронуты постмагматическими изменениями. В матриксе пород присутствуют щелочные карбонаты, сульфаты и хлориды, что обуславливает главную химическую особенность неизмененных кимберлитов – высокое содержание щелочей  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (до 8 мас. %) и  $\text{Cl}$  (до 6 мас. %). Другой отличительной чертой этих кимберлитов является низкое содержание  $\text{H}_2\text{O}$  (< 0.5 мас. %).

Результаты исследования [26] указывают на генетическую связь джерфшерита из ксенолитов с глубинным флюидом. Образование джерфшерита как в ксенолитах деформированных перидотитов из трубки Удачная-Восточная, так

и в разных ксенолитах из других кимберлитовых трубок связано со взаимодействием вещества этих ксенолитов и флюида. Кристаллизация джерфшерита в виде отдельных зерен в интерстициях ксенолитов и в «расплавных» включениях происходила непосредственно из взаимодействовавшего с ксенолитами раствора; джерфшерит, окаймляющий первичные  $\text{Fe-Ni-Cu}$  – сульфиды, образовался за счет их замещения в результате реакции с этим же раствором.

Очевидно, что катаклазиты и их катакластический матрикс возникли в гранатовых лерцолитах верхней мантии еще до их попадания в кимберлитовые брекции. Сульфидная минерализация в них появилась на заключительной стадии катаклаза, когда сложились условия для продвижения глубинного флюида и его накопления в мантии на этом уровне. Мы предполагаем, что сам процесс катаклаза и разуплотнения пород верхней мантии вызван нарастающим динамическим воздействием глубинного флюида, накапливающегося на этом уровне. Отмечаемая в ксенолитах катаклазированных лерцолитов сульфидная и сопровождающая ее минерализация отражает в какой-то мере состав данного флюида.

**Обсуждение.** Реальность существования глубинного (мантийного) флюида вряд ли можно теперь подвергнуть сомнению. Его участие в эндогенных процессах внутри земной коры – магматизме и метаморфизме – так же несомненно. Однако геодинамическая роль глубинного флюида окончательно еще не выяснена. В частности, мы не знаем, насколько активно его воздействие при передаче не только тепла, но и давления. С этой точки зрения чрезвычайно важно обратить внимание на деформации глубинных пород мантийного происхождения и среди них – на самые ранние, свидетельствующие о пластических и катакластических явлениях в породах мантии. Реликты деформационных структур такого рода обнаруживаются в аллохтонных массивах офиолитовой габбро-дунит-перидотитовой формации, выдвинутых с подкорových глубин в пределы складчатых поясов. При этом важно определить генетические признаки таких структур и текстур, сформулировать критерии синтетектоничности процесса их формирования, а также выявить связь развития деформаций с появлением динамически активного флюида. Данные полевых петрологических и структурных исследований соответствуют, скорее, известным представлениям о метасоматозе под влиянием глубинного флюида, экстрагирующего ряд более подвижных компонентов из состава мантийных перидотитов (лерцолитов).

Структурное соотношение мантийных перидотитов с более поздними дунитами и пироксенитами обычно рассматривалось в рамках представлений об их магматическом происхождении как результате магматических явлений [22 и др.]. Однако эти взаимоотношения с меньшей очевидностью могут свидетельствовать об их





возникновении при процессах глубинного метасоматоза. По данным детального картирования видно, что «по мере возрастания мощности и густоты жил дунитов гарцбургиты расчленяются на все менее мелкие блоки, вначале угловатые, а затем с извилистыми фестончатыми очертаниями. «Блоки-ксенолиты» сохраняют ориентировку полосчатости гарцбургитов. Контакты дунитов и перидотитов четкие, при этом отдельные кристаллы энстатита «плавают» в дуните вблизи контакта, а оливин образует «затеки» в перидотите. Вдоль контактов маломощных дунитовых «жил» прослеживаются односторонние или симметричные каймы крупных зерен диопсида. Тонкие оливковые (дунитовые) жилки нередко сменяются по простиранию диопсидовыми жилками. Выделения хромшпинелидов наблюдаются в дунитах в виде сегрегаций и цепочек зерен вдоль контактов с вмещающими перидотитами. В ряде случаев в дунитовых телах, круто секущих кристаллизационную полосчатость перидотитов, «сохраняется ориентировка хромшпинелидов, наследующая эту полосчатость (поперек контактов жил)» [22, с. 33].

Для нашего исследования весьма важно, что отмечаемые [22] в мантийных перидотитах наиболее ранние полосчатые текстуры фиксируют деформации послонного пластического течения кристаллического материала в субсолидусных условиях. Считается, что выявленные при петроструктурном анализе преобладающие оптические ориентировки кристаллов оливина в гарцбургитах обусловлены механизмами внутрикристаллических дислокаций, в первую очередь путем трансляционного скольжения кристаллической решетки с вероятным участием диффузионной ползучести. Однако в сухих условиях без участия флюида скорость деформации, судя по данным экспериментов, оказывается весьма низкой. Следовательно, такие деформации, скорее, осуществимы в присутствии флюида.

Существенно также, что температура формирования необласт энстатита и диопсида в катаклазированных гарцбургитах была определена в интервале 980–850° С [28]. Эти данные подтверждают возможность проявления деформаций в верхней мантии в субсолидусных условиях до глубины порядка 30–120 км и никоим образом не согласуются с представлениями о непосредственном участии магмы в процессе их формирования. Поэтому необходимо учитывать роль глубинного флюида в процессах дифференциации вещества и его структурных преобразований в твердо-пластичной мантии, и не только в качестве какого-то «облегчающего» данные процессы условия, но и как одного из важнейших активных факторов, определяющих указанные процессы как метасоматические. Таким образом, появление среди гарцбургитов дунитовых тел сложной конфигурации («даек», «каналов», по терминологии приверженцев магматического происхождения дунитов) следует рассматривать как результат вы-

сокотемпературного метасоматоза гарцбургитов в условиях пластического течения и сменяющих их сколовых деформаций под действием высоконапорного глубинного флюида.

**Заключение.** Формирование катаклазированных перидотитов (лерцолитов) и появление сульфидно-хлоридной минерализации может быть связано с активностью глубинного флюида в верхней мантии, где в кровле астеносферы создаются критические условия насыщения флюидом среды и ее разуплотнения. Этот глубинный флюид оказывал также и метасоматическое воздействие на минералы мантии, способствуя их рекристаллизации и образованию новых минеральных фаз и их ассоциаций (галоидно-сульфидных и пр.). Проявление этого взаимодействия широко распространено в мантийных ксенолитах кимберлитов. Это свидетельствует о том, что глубинный флюид взаимодействовал с мантийным веществом в сходных термодинамических условиях и, возможно, имел однотипный состав активных компонентов.

В составе глубинного флюида доказано присутствие  $\text{CO}_2$ ,  $\text{OH}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{P}$ , а также нередко ассоциированных с ними  $\text{K}$  и  $\text{Na}$ . Главными первичными компонентами являются  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ . На верхнем уровне литосферы, особенно в земной коре, в результате взаимодействия с кислородонасыщенными породами к ним присоединяются и выходят на первый план  $\text{CO}_2$ ,  $\text{OH}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , а также химически ассоциированные с ними щелочные металлы. При сохранении восстановительных условий среды и определенных ее  $PT$ -параметрах стабильно существуют нефидно-гидротермальные системы с ведущими компонентами  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

Активность глубинного флюида, кроме всего прочего, проявляется в создании зон локального сверхдавления, что приводит к перестройке структурно-текстурного порядка среды и ее приспособлению к присутствию флюида («флюидизации», деструкции и разуплотнению). Напряжения, создаваемые накапливающимся на этом уровне флюидом, могли приводить к широкому проявлению пластических деформаций и катаклазу кристаллических агрегатов в породах мантии. Иными словами, сам глубинный флюид, благодаря своей энергии (тепловой и динамической), мог прокладывать путь для продвижения, создавая зоны катаклаза и разуплотнения субстрата мантии. Таким образом, в результате воздействия флюида в мантии развиваются полосчатые катаклазиты и катаклазированные перидотиты со следами пластических деформаций.

#### Библиографический список

1. Авсюк Ю. Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.
2. Адушкин В. В., Ан В. А., Овчинников В. М. Структурные особенности внутреннего строения Земли // Физика Земли. 2000. № 12. С. 2–7.



3. Летников Ф. А. Синергетические аспекты проблемы образования глубинной нефти // Глубинная нефть. 2013. Т. 1, № 6. С. 790–810.
4. Летников Ф. А., Дорогокупец П. И., Лашкевич В. В. Энергетические параметры флюидных систем континентальной и океанической литосферы // Петрология. 1994. Т. 2, № 6. С. 363–369.
5. Летников Ф. А. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43, № 4. С. 291–307.
6. Лебедев Е. Б., Кадик А. А., Зебарин А. М., Дорман А. М. Экспериментальное изучение влияния воды на скорости упругих волн глубинных пород // Докл. АН СССР. 1989. Т. 309, № 5. С. 1090–1093.
7. Kern, H. M. Physical properties of crustal and upper mantle rocks with regards to lithosphere dynamics and high pressure mineralogy // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1993. Vol. 79. P. 113–136.
8. Jones A. G., Ledo J., Ferguson I. J., Farquharson C., Garcia X., Grant N., McNeice G., Roberts B., Spratt J., Wennberg G., Wolynec L., Wu Z. The electrical resistivity structure of Archean to Tertiary lithosphere along 3200 km of SNORCLE profiles, Northern Canada // Can. J. Earth. Sci. 2005. Vol. 42. P. 1257–1275.
9. Павленкова Н. И. Коровые и мантийные волноводы как возможные области генерации и миграции глубинной нефти // 2-е Кудрявцевские чтения – Всерос. конф. по глубинному генезису нефти и газа. М. : ЦГЭ, 2013. С. 141–145.
10. Павленкова Н. И. Пути миграции глубинных флюидов в земной коре и верхней мантии // 5-е Кудрявцевские чтения – Всерос. конф. по глубинному генезису нефти и газа. М. : ЦГЭ, 2016. С. 157–164.
11. 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 travel time data // Doklady Earth Sciences. 2001. Vol. 381 (9). P. 1119–1121.
12. 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.
13. 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 : Издательство НЦ Сатпаев, 1997. С. 83–91.
14. Koprnichev Yu. F., Sokolova I. N. Spatiotemporal variations of the Swave attenuation field in the source zones of large earthquakes in the Tian Shan // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2003. Vol. 39 (7). P. 568–579.
15. Koprnichev Yu. F., Sokolova I. N. Annular seismicity structures and the March 11, 2011, Earthquake (Mw=9.0) in Northeast Japan // Doklady Earth Sciences. 2011. Vol. 440 (1). P. 1324–1328.
16. Gufeld I. L. Geological consequences of amorphization of the lithosphere and upper mantle structures caused by hydrogen degassing // Geodynamics & Tectonophysics. 2012. Vol. 3(4). P. 417–435.
17. Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. Vol. 2 (4). P. 378–415.
18. Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс // Физико-химические аспекты. Королев : ЦНИИМАШ, 2007. С. 15–65.
19. Nicolas A. Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere. Kluwer Academic Publishers, Norwell. Mass., 1989. 367 p.
20. Kelemen P. B., Dick H. J. D. Focused melt flow and localized deformation in the upper mantle : juxtaposition of replacive dunite and ductile shear zones in Josephine peridotite, SW Oregon // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100, № B1. P. 475–496.
21. Tommasi A., Vauchez A., Godard M., Belley F. Deformation and melt transport in a highly depleted peridotite massif from Canadian Cordillera : implications to seismic anisotropy above subduction zones // Earth Planet. Sci. Lett. 2006. Vol. 252. P. 245–259.
22. Савельева Г. Н., Соболев А. В., Батанова В. Г., Сузлов П. В., Брюгманн Г. Структура каналов течения расплавов в мантии // Геотектоника. 2008. № 6. С. 25–45.
23. Kelemen P. B., Shimazu N. and Salters V. J. M. Extraction of Mid-Ocean-Ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels // Nature. 1995. Vol. 375. P. 747–753.
24. Соболев А. В., Похиленко Н. П. Ксенолиты катаклазированных перидотитов в кимберлитах Далдыно-Алакаитского района Якутии // Глубинные ксенолиты и верхняя мантия. Новосибирск : Наука. Новосиб. отд-ние, 1975. С. 48–55.
25. Агашев А. М., Похиленко Н. П., Черепанова Ю. В., Головин А. В. Геохимическая эволюция пород основания литосферной мантии по результатам изучения ксенолитов деформированных перидотитов из кимберлитовой трубки Удачная // Докл. РАН. 2010. Т. 432, № 4. С. 510–513.
26. Шарыгин И. С., Головин А. В., Похиленко Н. П. Джерфишерит в ксенолитах деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная (Якутия) : проблемы происхождения и связь с кимберлитовым магматизмом // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 3. С. 321–340.
27. Зедгенезов Д. А., Рагозин А. Л., Шацкий В. С. Хлоридно-карбонатный флюид в алмазах из ксенолита эклогита // Докл. РАН. 2007. Т. 415, № 6. С. 800–803.
28. Савельева Г. Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М. : Наука, 1987. 243 с.

**Образец для цитирования:**

Рихтер Я. А. Глубинный флюид и процессы деструкции и флюидизации среды в литосферной мантии // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 196–205. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-196-205>

**Cite this article as:**

Richter Ya. A. Deep Fluid and Processes of Destruction and Fluidization in the Lithospheric Mantle. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 196–205 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-196-205>