

## О дегазации Земли

*В. В. Гордиенко, 2019*

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,  
Киев, Украина

Поступила 11 декабря 2018 г.

В останні роки велику увагу геологів привертає дегазация Землі. Діапазон думок за різними аспектами проблеми дуже значний. Частина з них, з погляду автора, спирається на необґрунтоване припущення або неправильно інтерпретовані факти. У статті зроблено спробу коротко розглянути найсуперечливіші аспекти концепції за допомогою методів аналізу, що дає змогу застосувати адвекційно-поліморфну гіпотезу і деякі результати, отримані з її використанням. Необхідним виявилось наведення даних щодо тепломасоперенесення у тектоносфері, для якого доведено визначальний вплив на геодинаміку. Головну увагу приділено кількості речовини, що переноситься, та енергії, яку витрачають глибинні процеси. Розглянуто збіжність параметрів масового потоку, що переносить газову компоненту з мантії в кору та атмосферу, який виявлено за ізотопно-геохронометричними даними та схемою глибинних процесів у запропонованій гіпотезі. Наведено параметри процесу дегазации при магматизмі та циркуляції флюїдів під час утворення родовищ руд і вуглеводнів. Показано, що енергія, яку переносять флюїди, незіставна з енергією, необхідною для геодинамічних процесів. Проаналізовано утворення флюїдів у породах кори при активизації. Передусім вивчено утворення водневого флюїду та його роль в утворенні родовищ вуглеводнів. Загальна кількість корових флюїдів може бути узгодженою з кількістю флюїдів, фіксованою при дегазации Землі. Участь флюїдів з верхньої мантії не викликає сумнівів, вони виникають у процесі активизації тектоносфери, тепломасоперенесення, що супроводжується частковим плавленням порід. Однак їх кількість незначна порівняно з кількістю корових флюїдів. Обґрунтовано уявлення про відсутність умов у нижній мантії та ядрі для утворення флюїдів, здатних виноситися у верхню мантію та кору. Розглянуто швидкісні розрізи для обґрунтування такого процесу. Як регіони для цього контролю обрано перехідні зони між континентами й Тихим океаном, де швидкісні збурення можуть бути максимальними. Показано недостовірність аномалій швидкості поширення сейсмічних хвиль, які виділяють у нижній мантії за даними сейсмотомаграфічних досліджень.

**Ключові слова:** дегазация, утворення та перенесення флюїдів, кора, мантія та ядро Землі.

**Введение.** Цель статьи — рассмотреть явление дегазации Земли (ДЗ) с использованием разработанной автором адвекционно-поллиморфной гипотезы (АПГ) глубинных процессов [Гордиенко, 2017 и др.]. В последние годы к ДЗ привлечено большое внимание, отраженное во множестве публикаций [Дегазация ..., 2002, 2010 и др.]. Наметились части формирующегося массива информации, которые не только рассматривают разные стороны проблемы (что естественно), но и не согласуются меж-

ду собой и даже противоречат друг другу. Соответственно, с точки зрения автора они заслуживают отдельного рассмотрения. Однако вначале есть смысл представить параметры дегазации Земли по АПГ и некоторые другие относящиеся к делу сведения.

**Тепломассоперенос в тектоносфере Земли.** Оценка распределения температур в период непосредственно после аккреции и отделения ядра [Федорин, 1991; Литасов и др., 2016; Гордиенко, 2017 и др.] обна-

руживает превышение солидуса в интервале глубин мощностью более 1000 км. Охватившая его конвекция ведет к отделению коры, обеднению мантии источниками радиогенного тепла, кристаллизации, не успевшей за последующие 4,2 млрд лет распространиться глубже 700—800 км. Далее по времени следует тепловой режим, связанный с вековым охлаждением планеты через поверхность, выделением радиогенного тепла и периодическими выбросами его в процессе адвективного теплопереноса. Он происходит в виде всплываний и погружений минимальных способных к перемещению объемов вещества (диаметром около 60 км) — квантов тектонического действия (КТД). Гипотеза основана на экспериментальных данных о распределении радиогенной теплогенерации (ТГ) в коре и верхней мантии Земли. Обобщение этих сведений дает значения около  $4, 6$  и  $8 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>3</sup> в верхней мантии платформы, геосинклинали и океана (намечаются и промежуточные уровни). Суммы энергий, выделяемых в коре и мантии каждого из этих регионов, оказываются одинаковыми. Различия в геологической истории определяются распределением ТГ между корой и мантией. Для континентов (платформ, геосинклиналей, рифтов и зон одноактной активизации) проведено моделирование, позволившее количественно объяснить все наблюдаемые геологические события (глубину очагов магмы и ее состав для каждого этапа развития региона, мощность осадочно-вулканогенного слоя и ее изменение во времени, складчатость, метаморфизм и т.д.). Для платформ удалось построить всю последовательность событий за период 0—3,6 млрд лет (в этом интервале есть массовый материал для сравнения). Она без подбора согласуется с данными по возрасту для платформ всех континентов. Это 23 активизации (в перечень нельзя включить ни одного "лишнего" события) — 3 геосинклинальных, 11 рифтовых и 9 активизаций. Современная активизация не включена, так как на большей части территории платформ процесс еще не завершен. Экспериментально опреде-

ленный по аномалиям ТП расход энергии ( $14 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>2</sup>) активизаций соответствует разнице между радиогенной теплогенерацией в коре и верхней мантии ( $73,5 \times 10^{14}$  Дж/м<sup>2</sup>) и кондуктивным тепловым потоком (ТП) из тектоносферы ( $59,5 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>2</sup>). Другими словами, теплоперенос, вызывающий тектономагматическую активность, потребляет около 20% выносимой энергии (30% радиогенной). Радиогенной теплогенерации в тектоносфере вполне достаточно для объяснения глубинных процессов. Показано выполнение закона сохранения энергии в Земле.

В геосинклиналях число событий (в соответствии с ТГ мантии) больше в 1,5 раза, чем под современной платформой, в океанах — в 2 раза. Каждое событие (состоящее в геосинклинали и рифте из трех перемещений КТД, в зонах активизации из одного) включает эпизод коромантийного обмена. В кору вторгается частично расплавленное вещество в количестве, эквивалентном слою толщиной 7,5 км. На смену в мантию опускается столько же эклогитизированных коровых базитов. Исходя из примерного равенства площадей платформ и геосинклиналей на континентах и распространения океанической и субокеанической коры на 65% поверхности Земли, получим средний перенос вещества плотностью около 3 г/см<sup>3</sup> для периода 0—3,6 млрд лет по всей планете  $1,27 \cdot 10^{17}$  г/год. Именно этот параметр рассчитан для сравнения с массопотоком, который сопровождает дегазация Земли (см. ниже).

Проведенные расчеты не только подтверждают выполнение закона сохранения энергии, но и иллюстрируют сокращение частоты активных процессов за 4,2 млрд лет почти в 5 раз, что объясняется сокращением концентрации радиоактивных элементов по мере их распада. На рис. 1 видно, что изменение интенсивности теплопереноса больше соответствует изменению ТГ мантии, чем коры. Это естественно, так как тепловыделение в коре расходуется в основном на поддержание теплового потока через поверхность.

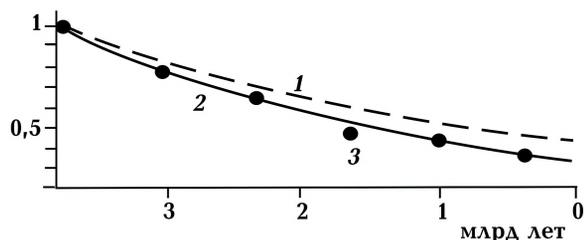


Рис. 1. Изменение во времени теплогенерации пород коры (1), верхней мантии (2) и количества актов теплопереноса (3) за каждые 0,6 млрд лет.

Роль летучих в описанных процессах значительна в части влияния на плавление, метасоматоз, метаморфизм, темп полиморфных преобразований минералов коры и мантии. В выделении и переносе энергии — ничтожна. Летучие появляются в мантии при плавлении в небольшом количестве. В коре их возникает много больше, к генерируемым плавлением добавляются метаморфогенные и образующиеся при катагенезе.

**Периодичность активизаций и дегазаций.** Современное распространение на Земле активизированных регионов — одно из наибольших в фанерозое. Очевидна активность альпийских геосинклиналей (в том числе завершивших собственно геосинклинальное развитие), к которым автор относит и островные дуги рифтов, срединно-океанических хребтов (СОХ) и задуговых бассейнов. В океанических котловинах изучение абиссальных холмов (которые Г. Менард считал наиболее распространенной формой рельефа планеты [Менард, 1966]) позволяет установить среди них проявления не только киммерийского, но и неоген-четвертичного вулканизма. Зоны современной активизации (СА) на платформах (вплоть до эпикиммерийских) давно известны, в последнее время выяснилось их широкое распространение. Наглядной иллюстрацией всемирного характера активизации может служить схема проявлений сейсмичности. Она далеко не полна. Например, согласно рис. 2 на большей части Украины нет землетрясений, на самом деле их достаточно мно-

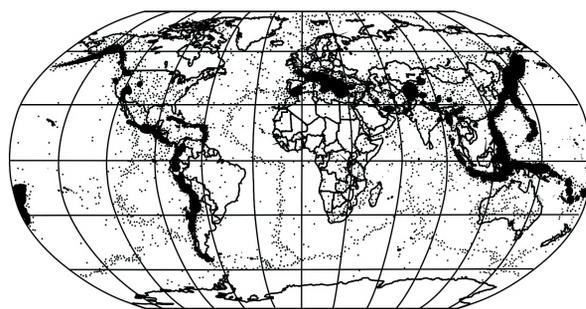


Рис. 2. Размещение эпицентров землетрясений на Земле (1963—1998 гг., 358 214 шт.), данные Геологической службы США, Альбукерка, [http://aslwwww.cr.usgs.gov/Seismic/Data](http://aslwwww.cr.usgs.gov/Seismic>Data).

го (рис. 3) и они в основном приурочены к зонам СА, выделенным по данным комплекса геолого-геофизических методов [Гордиенко, 2017 и др.].

По распространению сейсмичности можно предположить СА Воронежского массива, в пределах которого имеются и другие признаки этого процесса [Савко и др., 2008 и др.]. Но систематического изучения СА на платформах вне Украины нет, поэтому часто приходится сталкиваться с утверждениями о геологических событиях и геофизических аномалиях на пассивных кратонах. На самом деле, по предварительным оценкам автора, СА действует на половине площади докембрийских платформ всех континентов. Однако есть и неактивизированные пока участки. Об этом

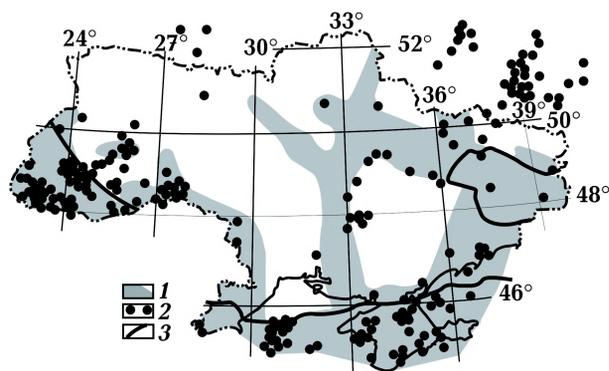


Рис. 3. Зоны современной активизации территории Украины и эпицентры землетрясений: 1 — зоны СА, 2 — эпицентры, 3 — границы докембрийской платформы.

свидетельствуют, например, результаты изучения скоростных разрезов подкоровой мантии платформенной части Украины (рис. 4) и многие другие данные.

Таким образом, в настоящее время активизированными оказываются регионы, занимающие около 90 % поверхности планеты.

Сопоставимая площадь активизации приходится и на киммерийское время. Это, прежде всего, океанизация огромных пространств современных океанов, включая срединные хребты. Широко распространены геосинклинали этого периода в Тихоокеанском поясе, меньше в альпийском. Континентальные рифты представлены несколько меньше альпийских, но, возможно, дело в недостаточной изученности. Например, на детально исследованной Западно-Сибирской плите обнаружены рифты, дополняющие преуральские и зауральские, близкая ситуация и на Тимано-Печорской плите. Активизация охватывает большие площади континентальных платформ. На территории Украины этот этап неплохо изучен [Шумлянский, 1983, 2007 и др.]. Следы герцинского активного периода в океанах можно обнаружить только на очень ограниченных площадях, но на континентах они представлены значи-

тельно шире — и на платформах, и в геосинклинальных системах, как и проявления каледонского и байкальского (позднерифейского). Все эти вспышки активности описываются именно для названных периодов результатами расчетов мантийного теплопереноса по АПГ. Между ними наблюдается относительный "тектонимагматический покой". Но основная причина приведения здесь краткого перечня интервалов времени с различной активностью ("цитаты из канона Штилле") — показать, что по современному уровню дегазации можно судить о ее параметрах (максимальных или близких к ним).

**Дегазации Земли по изотопно-геохронометрическим данным.** Существует направление в исследовании ДЗ, занимающееся явлением в целом. Оно основано на моделировании изотопно-геохронометрических систем [Азбель и др., 1988; Толстихин, 1991 и др.] и должно разрешить проблему соотношений концентраций K, U, Sr, изотопов He, Ar, Ne, Xe и других благородных газов в мантии, коровых базальтах и атмосфере. Фиксируемые противоречия снимаются в случае принятия представления о массопотоке из мантии в кору и обратно, происходящем с изменяющейся во времени интенсивностью. Данные геохимии радиогенных изотопов свидетельствуют об участии мантии, верхней, нижней континентальной и океанической коры в процессах фракционирования, смешения и дегазации вещества.

Полученное авторами временное изменение массопотока ( $F$ ) показано на рис. 5. Оно согласуется с относительным изменением числа актов теплопереноса в мантии платформы в единицу времени, что можно считать еще одним подтверждением принятых параметров энергетического баланса тектоносферы. Подчеркнем, что рассматриваемые расчеты дегазации базируются на обоснованном авторами представлении о том, что "... широкомасштабный транспорт летучих компонентов из недр Земли выполняется расплавами, и даже в пределах континентальной земной коры ювенильные летучие ком-

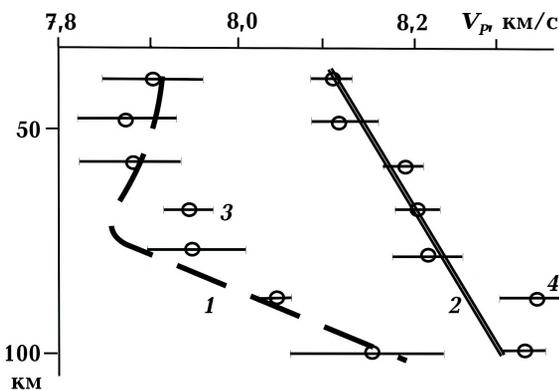


Рис. 4. Скорости распространения продольных сейсмических волн в подкоровой мантии платформенной части Украины [Гордиенко, Гордиенко, 2018]: 1, 2 — расчетные модели (1 — под зоной СА, 2 — под неактивной платформой), 3, 4 — экспериментальные данные (3 — под зоной СА, 4 — под неактивной платформой).

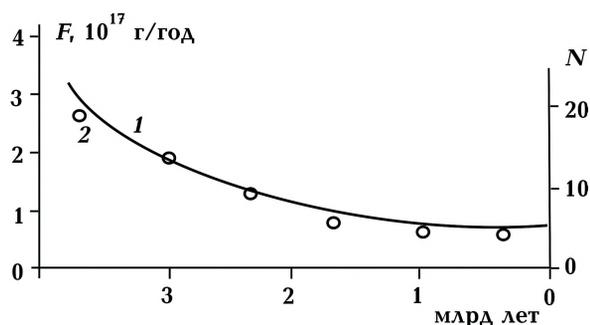


Рис. 5. Изменение во времени массопотока (1), по [Азбель, Толстихин, 1988], и количества актов теплопереноса (2) за каждые 0,6 млрд лет.

поненты мигрируют от соответствующих магматических проявлений только на маленькие расстояния. В мантии ... более или менее интенсивный поток летучих компонентов, оторванных от расплавов, представляется еще менее вероятным (мантийная часть континентальной литосферы может рассматриваться как единственное исключение)". Исключение связано с тем, что "... мантийные летучие компоненты наблюдаются в регионах, характеризующихся современной или сравнительно молодой магматической активностью, и только в таких регионах" [Азбель, Толстихин, 1988, с. 6]. Маломощная литосфера пронизана магматическими каналами, по которым идет вторжение расплавов в кору.

Полученное соответствие (см. рис. 5) позволяет рассчитать среднюю величину массопотока за последние 3,6 млрд лет —  $1,22 \cdot 10^{17} \text{ г/год}$ . Рассчитанный энергетический баланс соответствует и уровню массопотока, необходимому для наблюдаемой ДЗ. Совпадение этих независимых результатов позволяет говорить о достоверности использованных схем.

В последующие годы работой представительной международной группы специалистов из ИКИ РАН (Москва), Исследовательского центра петрографии и геохимии (Нанси), Оксфорда, Института Макса Планка (Майнц) подтверждено, что к настоящему времени "Мантия Земли является весьма дегазированным резервуаром, в ней сохранилось менее  $10^{-4}$  части

изначально находившегося количества летучих элементов. Наиболее интенсивная дегазация имела место в течение первых сотен миллионов лет эволюции Земли. Оба эти вывода мало зависят от модели: они непосредственно следуют из неравенства  $\text{Xe(Pu)} / \text{Xe(U)}_{\text{ДММ}} \ll \text{Xe(Pu)} / \text{Xe(U)}_{\text{СЛОС}}$ " [Толстихин и др., 2012].

Отметим, что приведенная схема отводит летучим очень скромную роль в переносе энергии массопотоком. А в модели АПГ весь так понимаемый массопоток на Земле — это перенос вещества, эквивалентного слою мощностью 13 км, на расстояние около 50 км в менее чем половине (45%) событий теплопереноса на фоне перемещения материала КТД мощностью 60 км на расстояние 200—300 км во время всех событий.

Собственно, на этих результатах общая оценка ДЗ по известным данным завершена. Сведений о ядерной принадлежности какой-то (тем более значительной) части флюидов нет. Изучение ядра выполняется по схеме без проверки по приповерхностной информации, исключая сведения по составу железных метеоритов, которые можно привлечь к рассмотрению, но не опереться на них.

**О составе ядра.** Несмотря на обилие "косвенных улик", невероятным представляется содержание в ядре заметного количества водорода, сохранившегося с момента дифференциации Земли. При плотности в  $PT$ -условиях ядра  $0,9 \text{ г/см}^3$  [Белов и др., 2002 и др.] нельзя обосновать сохранность первичного водорода (если он имелся) вне металлических и силикатных частиц в ядре с плотностью на порядок выше. По имеющимся экспериментальным оценкам в железе и силикатах его могло быть около  $7 \cdot 10^{-5}$  в момент аккреции. Эта величина неплохо согласуется с данными по железным метеоритам [Clesi et al., 2018]. Подобная концентрация не может создать условий для выноса вещества из ядра. В качестве сведений о большем содержании водорода в ядре встречаются утверждения вроде "мы сократили количество легких элементов во внут-

реннем ядре в соответствии с дефицитом скорости. Водород — хороший кандидат, таким образом, ядро Земли может быть скрытым резервуаром водорода" [Sakami et al., 2016]. Не лучше выглядят и гипотетические построения, согласно которым водород образуется при разложении воды, занесенной на поверхность ядра субдуцирующей океанической плитой [Iizuka-Oku et al., 2017]. Не говоря об ошибочности гипотезы тектоники плит в целом, авторам следовало бы помнить, что по фокальным зонам погружение плит до глубины 400—650 км установлено только на 7 % контакта континента и океана и океаническая кора в гипотезе уже один раз отдала воду на плавление "литосферного клина" на глубине 100—150 км. Сама по себе идея погружения океанической плиты в мантию энергетически абсурдна [Гордиенко, 2018].

Непредвзятый анализ информации о скорости и плотности в ядре, проведенный в последнее время в связи с новыми данными [Badro et al., 2014; Литасов и др., 2016; Zhang et al., 2016 и др.], обнаруживает существенные допуски в оценке дополнений железа и никеля ( $Fe/Ni \sim 16$ ) ядра легкими элементами ( $\sim 5\text{--}10\%$  для внешнего и  $\sim 2\text{--}3\%$  для внутреннего). Экспериментальных данных в необходимом диапазоне  $PT$ -условий пока нет, но есть возможность оценки ситуации модельными расчетами с привлечением космохимических аргументов. Водород признан практически отсутствующим в ядре. Не исключено, что он поступил на Землю в основном только после его формирования. Содержания других легких элементов еще могут быть заметно пересмотрены, но их набор выглядит довольно обоснованным.  $C$ ,  $Si$ ,  $S$  присутствуют в метеоритах и хорошо растворяются в расплаве  $Fe-Ni$ . Не исключено, впрочем, что представление о наличии углерода базируется на данных по включениям углистых метеоритов, состав которых не позволяет отнести эти образования не только к ядру, но и к глубокой части мантии. Форма нахождения кислорода определяется менее уверенно, воз-

можно, в частности, вытеснение его из кристаллизующегося внутреннего ядра.

**Энергия, выносимая процессом дегазации.** Определим энергию дегазации по известным ее проявлениям. По мнению автора, разница между "холодной" и "горячей" (вулканической) дегазациями не принципиальна. Оба явления приурочены к зонам СА, только в первом случае магматизм представлен интрузивной разновидностью. Судя по площадям территорий холодной дегазации, она распространена шире горячей. Но доступнее для изучения вторая. Из приводимых в работах вулканологов данных [Ритман, 1964; Набоко, 1967; Ломизе, 1999; Siebert et al., 2011 и др.] следует годовой объем эффузивов Земли около  $2 \text{ км}^3$ , примерно  $3\text{--}4$  вес. % составляют газы [Юрова, 2018 и др.]. Более детальная информация, представленная в табл. 1 по данным из работы [Menaker, 2011], заметно не меняет дела.

В гидротермах и паровых струях у вулканов с температурой до  $200\text{--}250^\circ\text{C}$  газовая компонента по весу уже резко сокращена, более 99 % приходится на жидкую воду и пар.

Магматические флюиды поступают на поверхность с аномальной температурой порядка  $1000^\circ\text{C}$  (уточнять ее нет смысла — см. ниже). Вынесенная энергия составляет  $1,5\text{--}2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$ , т. е. на 3 порядка меньше фонового ТП. Увеличение этой цифры в несколько раз за счет холодной дегазации ничего не изменяет — эффект энергетически ничтожен. Вынос энергии магматизмом в целом (т. е. с учетом силикатной жидкости) —  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$ , достигает 1 % фонового ТП и также не играет никакой роли в энергетике реального теплопереноса, определяющего геодинамику тектоносферы Земли. Тем не менее сторонники рассматриваемой концепции не обращают внимания на такую (очевидную) информацию и сопровождают сведения о газопроявлениях утверждениями вроде "Идея водородной дегазации позволяет решить проблему источников энергии геологических процессов" [Ретеюм, 2018].

Впрочем, близкие по смыслу выводы делаются и в случае, когда авторы оперируют конкретными данными об энергии, выносимой флюидами. Например, оценки расхода энергии на образование среднего гидротермального рудного месторождения приводят к значениям около  $10^{12}$  Дж. С ними можно согласиться, основываясь на результатах автора по моделированию таких объектов. Но нельзя принять утверждение, что это значение в тысячи раз превосходит энергию, выносимую ТП за тот же период [Старостин, Игнатов, 1996]. Время формирования отдельных жил определено авторами в сотни лет, рудных полей — в десятки тысяч лет [Старостин, Игнатов, 1996]. Оценим время формирования среднего месторождения в 1000 лет, площадь — как  $200 \times 200$  м (что соответству-

ет ширине зон циркуляции рудоносных флюидов в месторождениях Украины). Средний расход энергии на единицу площади составит около  $1 \text{ мВт/м}^2$ , что более чем на порядок ниже фонового ТП.

**Водородная дегазация.** Особое внимание в ДЗ многими авторами уделяется водороду. Возможно, естественный водород имеет некоторые шансы в будущем стать одним из "самостоятельных" (вне углеводородов — УВ) горючих полезных ископаемых. Впрочем в настоящее время за признаки такой возможности выдаются в основном ничтожные выделения газа, часто не связанные с глубинными процессами.

Содержание водорода в атмосфере (в основном как составной части водяного пара) —  $2,5 \cdot 10^{11}$  т, т. е.  $0,5 \cdot 10^{-4}$  общей

**Т а б л и ц а 1.** Содержания компонент рудного раствора в магмах [Menaker, 2011] и состав газа гидротерм и фумарол камчатского вулкана Мутновский [Геотермические ..., 1986]. Эндогенный режим регионов приведен по представлениям АПГ

Компоненты	Содержание, вес. %		
	Расплав основных пород		
	Океанические регионы	Геосинклинали	Рифты
H <sub>2</sub> O	0,4—0,5	1,9	1,6
Cl	0,3	1,2	2,6
S	0,8—1,2	0,9	0,9
CO <sub>2</sub>	0,3—0,4	0,6	2,0
Расплав кислых пород			
H <sub>2</sub> O	—	2,2	3,6
Cl	—	0,8	1,7
S	—	0,1	0,1
CO <sub>2</sub>	—	0,4	0,2
Гидротермы и фумаролы вулкана Мутновский			
CO <sub>2</sub>	0,63	H <sub>2</sub>	0,003
H <sub>2</sub> S	0,03	CH <sub>4</sub>	0,009
N <sub>2</sub>	0,1	—	—

массы атмосферы. Собственно водорода в сухой атмосфере  $1,8 \cdot 10^{10}$  т (табл. 2). Если исключить из рассмотрения оценки интенсивности процесса, где эмпирические данные отсутствуют или между ними и выводами встроена цепочка предположений [Gilat, Vol, 2012 и др.], то получим для Земли вынос водорода около  $4 \times 10^5$  т/год, которые можно в какой-то мере считать результатом обобщения имеющейся информации [Войтов, Рудаков, 2000; Белов, 2003 и др.]. Это ничтожная величина по сравнению с остальными газами. Тем не менее необходимо учитывать, что речь идет о водороде, сохранившемся в поверхностных условиях. В глубинных флюидах его относительное содержание может быть выше. А. Ритман отмечал, что в пламени над поверхностью лавового озера температура на 150—200 °С выше, чем на его дне и на 550 °С выше, чем под поверхностной затвердевшей коркой [Ритман, 1964]. Им было высказано логичное мнение о выгорании водорода (хотя не обязательно дело ограничивается только им). В этом случае в пламени образуется часть водяного пара, фиксируемая как компонент вулканического газа. Водорода до окисления может оказаться больше, чем указано выше, в несколько раз. Изучение распределения водорода до его приповерхностного окис-

ления в зонах СА представляется важным в теоретическом и прикладном смысле [Гордиенко, 2017 и др.]. Однако и реально увеличенное количество газа не только не может выступать в "качестве основного источника энергии для внутриземных процессов" [Gilat, Vol, 2000], но и вообще не заслуживает упоминания в этом качестве.

С водородом связан [Дегазация ..., 2002, 2010 и др.] совершенно умогипотетический механизм мощного глубинного процесса. Предусматривается образование в мантии или поступление из ядра колоссальных порций  $H_2$ , который окисляется не менее внушительным количеством кислорода, обеспечивая энергией гигантские всплывающие плюмы. Если окислить указанную выше величину водородного потока (другой информации просто нет) и отнести ее к 0,1 поверхности Земли, получим значения ТП на порядки ниже фонового. Скоростная аномалия, соответствующая гораздо более интенсивному (но воображаемому) событию, должна составлять, по крайней мере, 0,1 км/с. Такие возмущения в нижней мантии неизвестны (см. ниже), в верхней их причины хорошо изучены и не связаны с предлагаемым явлением.

Можно рассчитать предполагаемый "выброс" водорода по количеству, необходимому для формирования крупного месторождения УВ. Конечно, такая оценка будет завышенной, так как месторождение локально и не достигает размеров плюма. Но и в этом случае сгорание водорода дает несколько единиц  $10^{11}$  Дж/м<sup>2</sup>, в то время как на активные процессы (не учитывая поддержания фонового ТП) необходимо  $(5—8) \cdot 10^{13}$  Дж/м<sup>2</sup> [Гордиенко, 2017 и др.].

Еще одним применением дегазации в последние годы становится обсуждение участия поднявшегося на поверхность  $H_2$  в разрушении озонового слоя. И в этом случае отсутствует информация о количестве вовлеченного в процесс водорода. Имеющиеся экспериментальные данные [Ozone ..., 2009; Douglass, Fioletov, 2011; Друзьяк, 2013 и др.] о процессах в озоновом слое обнаруживают только пары воды и

**Т а б л и ц а 2. Массы составных частей сухого воздуха**

Газ	Тонн
Азот	$3,85 \cdot 10^{15}$
Кислород	$1,18 \cdot 10^{15}$
Аргон	$0,7 \cdot 10^{14}$
Углекислота	$2,5 \cdot 10^{12}$
Неон	$6,1 \cdot 10^{12}$
Гелий	$4,1 \cdot 10^{12}$
Криптон	$1,8 \cdot 10^{12}$
Метан	$10^{12}$
Ксенон	$1,8 \cdot 10^{11}$
Водород	$1,8 \cdot 10^{10}$

незначительную концентрацию других соединений водорода. Это естественно: при перемещениях в атмосфере неизбежны соответствующие реакции, т. е. прямых сведений о вовлечении такой дегазации в события в стратосфере нет. Соединения водорода (включая пар) играют небольшую роль в разрушении озона по сравнению с другими факторами. Отсутствует сопоставление влияния разрушающих воздействий с естественной убылью озона: его молекулы "живут" 0,5—3 месяца. Будучи тяжелее в 1,6 раза окружающих, они погружаются, попадают в непригодные *PT*-условия и распадаются.

С точки зрения автора, большое внимание к озоновому слою как защитнику жизни на поверхности Земли от губительной ультрафиолетовой (УФ) радиации необоснованно. От наиболее коротковолнового (менее 200 нм) УФ-излучения планеты прикрывают молекулы азота и кислорода, образующие под его влиянием ионосферу. УФ-лучи с длиной волны до 240—250 нм разъединяют атомы молекул кислорода, вместе с "прилипающими" свободными электронами они создают трехатомную молекулу озона. Этот газ поглощает ультрафиолет в диапазоне длин волн 280—320 нм, но параллельно действует и молекулярное рассеивание лучей. На максимальной длине волны оба механизма одинаково эффективны, на минимальной поглощение озоном в 5 раз сильнее. Однако проведенное сопоставление описывает единичные акты. Количество молекул газов воздуха больше озоновых на 6 порядков (весь озон атмосферы, сконденсированный при 1 атм и 0 °С, составляет слой мощностью 3 мм, воздух — около 8,3 км). Преимущество рассеивания очевидно. Суммарное влияние обоих факторов не приводит к полному исчезновению жесткого УФ ниже тропопаузы. Присутствуют длины волн более 290 нм. Весь пакет (до видимой части спектра — 400 нм) достигает поверхности Земли. При мало изменяющейся среднегодовой мощности (числе молекул над единицей площади в единицах Добсона (DU)) озонового слоя на Земле

( $300 \pm 8$  %) интенсивность эритемного излучения изменяется с широтой более чем в 5 раз, практически согласованно с общей инсоляцией. Очевидно, это вызывается различиями инсоляции по широте, а не степенью эффективности экрана (рис. 6).

Если упомянуть, что у УФ-излучения есть и положительные для биосферы свойства (выработка витамина D у человека и пр.), то, возможно, нас не должно особенно беспокоить утонение озонового слоя. Тем более что время его изучения невелико по сравнению с длительностью возможных естественных вариаций параметров объекта, и не исключено, что за утонение сейчас принята часть волнообразного изменения (см. рис. 6).

**Коровые источники дегазации.** Непосредственный выход флюидов на поверхность локализован. Такая форма затрудняет оценки расходуемого материала. Максимально приблизиться к действительности можно в случае гидротермального рудного месторождения. Через его объем примерно за 50 тыс. лет пронесется эквивалент водяного столба высотой около 1 км. С меньшей определенностью такую же величину можно получить для месторождения углеводородов: в этом случае часть

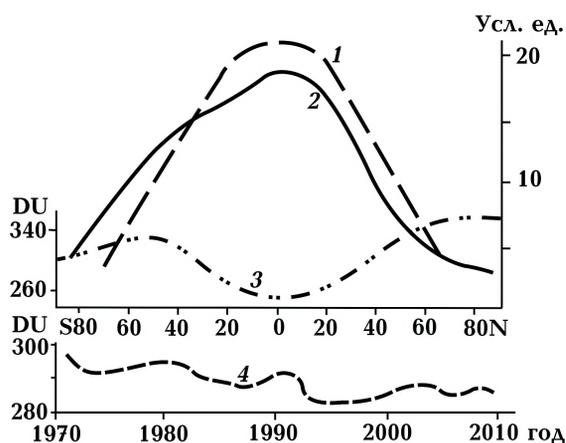


Рис. 6. Мощность озонового слоя и солнечная радиация на поверхности Земли. Изменения по широте: 1 — полная величина инсоляции, 2 — эритемная часть инсоляции, 3 — мощность озонового слоя. Изменение во времени: 4 — среднеземная мощность озонового слоя на широтах 60 °S—60 °N.

необходимой для расчета информации очень противоречива и не всегда представляет собой экспериментальные данные. Сложнее оценить этот параметр для вулкана. Период, для которого подобраны хоть какие-то данные, ограничен последними 10 тыс. лет. Площади выноса флюида (кратерных озер или фумарольных полей) весьма разнообразны. Количество действующих вулканов по данным разных источников не совпадает [Александров и др., 1996; Giggenbach, 1997; Siebert et al., 2011; Гордиенко, 2017 и др.]. Тем не менее в пересчете на 50 тыс. лет получаем примерно ту же цифру.

Значительная часть воды, поступающей на поверхность, возвращается в конвекционную ячейку или попадает в окрестности магматического очага. Имеются сведения о согласовании изотопии кислорода гидротерм, гейзеров и поверхностных водотоков [Бабинец, Ветштейн, 1967 и др.]. В работе [Геотермические ..., 1986] приведены данные по изотопии кислорода в метеорных водах Камчатки и паровых струях вулкана Мутновский. Концентрации изотопа  $^{18}\text{O}$  совпадают. Это, по мнению авторов, "свидетельствует в пользу метеорного происхождения основной части воды теплоносителей и их газовой и минеральной составляющей. В то же время высокое значение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ( $10^{-5}$ ) с большой вероятностью указывает на присутствие мантийного вещества в гидротермах" [Геотермические ..., 1986, с. 194].

Таким образом, за время действия объекта дегазации для обеспечения процесса должно образоваться гораздо меньше воды. К сожалению, полной определенности в подобных расчетах достичь не удастся. Вероятно, требующееся количество не превышает 0,5 км. Распространено даже мнение, что "Количество ювенильной воды, выделяющейся из магмы, ... по данным ряда исследователей не превышает 5—10 % всей массы фумарол, гейзеров и других термальных источников" [Гальперин и др., 2009, с. 111].

Рассмотрим некоторые оценки генерации флюидов в коре зоны СА.

Расчет напряжений, вызванных формированием теплового поля внутри и вокруг перегретых вторжений мантийного вещества в кору, показывает, что за первые сотни тыс. лет в каждой единице объема десятки раз превышались напряжения, обычно снимаемые коровыми землетрясениями небольшой магнитуды, нарушалась сплошность среды, возможно, возникла трещиноватость. К такому же результату ведут и относительные перемещения блоков коры под воздействием изменений плотности тепловой и метаморфической природы. На роль источника флюидов при прогреве в реальных породах "гранитного" и переходного слоев консолидированной коры претендует прежде всего биотит [Гордиенко и др., 2005; Kukkonen, 2011 и др.]. Его содержание в гранитах до 5 %, во многих гнейсах до 15 %, структурной воды этот минерал содержит  $n \cdot \%$  по объему. Большую часть (около 60 %) ее биотит отдает при 600—700 °С, т. е. при его переходе в менее водосодержащие и безводные минералы образовавшиеся поры будут заполнены флюидом, а часть воды уйдет в расплав (растворимость ее достигает 50 %). Трещиноватость не обязательно ведет к появлению заметного порового пространства. Однако при переходе биотита через амфиболы к пироксенам (переход амфибол — пироксен также связан с выделением воды) плотность минерала возрастает примерно на 3%, что должно обеспечить сопоставимый поровый объем.

При расчете объема метаморфогенной воды использованы следующие данные:

- о распределении фаций метаморфизма по глубине в земной коре Украинского щита [Гордиенко и др., 2005];
- о среднем содержании воды в породах разных фаций метаморфизма [Ферхуген, 1962; Kukkonen, 2011 и др.];
- об изменении температур в коре зон СА по сравнению с корой неактивной платформы.

В результате получено значение в 150 м. Образование этих вод сопровождается дополнительным метаморфизмом коры в зоне одноактной активизации. Он предваряет

ся в альпидах аналогичным по характеру процессом, завершившим геосинклинальный цикл 10—50 млн лет назад. Возможно, часть геосинклинального флюида в коре еще сохранилась. Это региональные проработки коры, не ограниченные локальным районом формирования объектов дегазации. Охваченный флюидизацией слой обладает большой мощностью — до 25 км. Глубже 30 км метаморфизм пород гранулитовой и эклогитовой фаций также проявляется, но не сопровождается заметным выделением воды.

Процессы дегидратации происходят и без приближения к температуре солидуса. Один из таких случаев довольно детально рассмотрен по материалам изучения Кольской сверхглубокой скважины [Кольская ..., 1984]. Установлено, что на глубинах 4,5—10 км около 30 % разреза представлено трещиноватыми зонами, изолированными сверху непроницаемой толщей. В зонах до 2 % высоконапорной высокоминерализованной воды при  $T = 100 + 150$  °С. Глубже таких зон нет. Происхождение порового пространства и воды — метаморфизация пород зеленосланцевой фации в амфиболитовую. Раз возникнув, зоны могут сохраняться более 1 млрд лет. В конкретной ситуации процесс обусловлен очень быстрым смещением фронта метаморфизма под влиянием мощных базальтовых излияний, т. е. при прогреве сверху. На территории Украины можно предположить возможность гидратации такой природы для севера Волыни. Вероятно это и в районах развития траппов Сибирской платформы, верхняя часть коры которых в период вендской и мезо-палеозойской активизаций также прогревалась не только снизу, но и сверху при формировании "базальтового плаща". В других случаях подобные образования могут формироваться на других (но не очень больших) глубинах.

Иная ситуация складывается в породах мощного осадочного комплекса геосинклиналей, вовлеченного в процессы шарьирования и надвигообразования. Находящиеся на поверхности породы авто-

хтона оказываются (например, в юго-западной части Складчатых Карпат на территории Украины) на глубине около 10 км при  $T$  около 300—350 °С. Названные значительные температуры обусловлены высоким ТП в соответствующей части геосинклинали (60—70 мВт/м<sup>2</sup>). Очевидны условия для быстрого литогенеза и дегидратации осадочных пород на всю глубину слоя (сопоставимую с мощностью аллохтона). Нижняя часть толщи преобразуется в породы зеленосланцевой фации. Суммарное выделение воды очень велико: у прежней поверхности порядка 20 %, у подошвы осадочного автохтона — первые проценты. Трудно оценить ту часть, которая к настоящему времени останется в породах, так как вышележащая толща не кажется непроницаемой. Можно допустить, что под надвигами альпид еще сохранились первые проценты воды в слое мощностью около 5—10 км. Длительность жизни гидратированного слоя нуждается в специальном рассмотрении.

Упомянутые региональные объекты не очень заметны в виде аномалии скорости сейсмических волн. Это связано с низкой концентрацией флюида в консолидированной коре (менее объемного 1 %). Впрочем, известны случаи их обнаружения в Донбассе и Закарпатском прогибе. Для заметных аномалий электропроводности флюида достаточно, эти возмущения чаще фиксируются.

Малоглубинная кислая интрузия, к непроницаемой зоне над которой часто приурочены интенсивная циркуляция флюида и рудные месторождения, также может внести вклад в флюидизацию среды. По данным для детально изученных Главной антиклинали и Нагольного кряжа Донбасса интрузия под рудным районом имеет мощность около 5 км [Александров и др., 1996]. На период киммерийской активизации содержание воды в образовавшей ее магме можно оценить по данным табл. 1 в 400 м, т. е. участок над нею оказывается в преимущественном положении в смысле возникновения интенсивной циркуляции рудоносного раствора. Она будет сосредото-

чена преимущественно в узкой разломной зоне высокой проницаемости (шириной в первые сотни метров). Это может способствовать вовлечению в теплоперенос растворов из соседних участков над кровлей интрузии.

В целом можно считать, что коровая генерация удовлетворяет потребности выноса флюидов через поверхность Земли в зонах СА. Это утверждение не следует рассматривать как отрицание мантийной компоненты. Она, несомненно, существует, о чем свидетельствуют мантийные метки гелия и другие признаки. Но по массе эта часть незначительна. Оценка в рамках теплопереноса по АПГ — не более 25 м водяного столба в среднем для территории СА.

**Водородная дегазация коры и углеводороды.** Способность консолидированной земной коры формировать месторождения УВ в период СА можно связать с генерацией водорода при серпентинизации ультраосновных и основных пород. "Оливиновые породы редко встречаются в неизменном виде. Обычно они более или менее серпентинизированы и часто целиком превращены в змеевики — серпентиниты" [Заварицкий, 1961, с. 223]. "При проведении глубокой скважины ..., обнаружившей на глубине несерпентинизированный дунит, в дуните была встречена полость, содержащая сильно сжатый газ — водород" [Заварицкий, 1961, с. 226].

Возможными представляются реакции оливина с водным флюидом, содержащим углекислоту [Дмитриев и др., 1999]. На дне океана предполагается существенная роль морской воды, глубоко проникающей в перегретые породы вокруг магматического очага в недрах СОХ [Дмитриев и др., 1999]. Такие же очаги в средней и нижней частях континентальной коры (на глубинах 20—40 км), сложенной преимущественно основными и ультраосновными породами, формируются на геологически краткое время в период СА. При переработке части минералов  $1 \text{ км}^3$  гарцбургита и соотношении вода: порода 2 : 1 образуется  $5 \cdot 10^5$  т  $\text{H}_2$  и  $2,5 \cdot 10^5$  т  $\text{CH}_4$ . При реакции  $\text{H}_2$  с ко-

ровым углеродом получим (учитывая уже имеющийся метан)  $\sim 6$  тыс.  $\text{м}^3/\text{м}^2$  метана. Более полная переработка породы или вовлечение в процесс слоя мощностью в несколько километров, концентрация метана на части территории могут обеспечить формирование реальных месторождений УВ. Незначительным количеством воды, принесенным мантийными вторжениями в кору (см. выше), участвующий в процессе флюид не исчерпывается. Гораздо больше приносит дегидратация амфиболов, еще встречающихся в нижней и средней коре.

Необходимым представляется [Базылев, 2000] предварительный метаморфизм пород, содержащих оливин, при температурах выше температуры собственно серпентинизации (более  $600^\circ\text{C}$ ). В этих условиях формируется пылевидная вкрапленность аваруита (самородного сплава с примерным составом  $\text{Ni}_3\text{Fe}$ , часто встречающегося акцессорного минерала в серпентинизированных офиолитах). Наличие таких метаморфических образований в фундаменте СОХ представляется вполне реальным. Предварительный метаморфизм испытали и породы континентальной коры, примером *PT*-условий таких процессов могут служить данные по УЩ.

При воздействии горячего флюида на метаморфизованную породу низов коры СОХ фугитивность кислорода в ходе серпентинизации буферизуется аваруитом, а углекислоты — кристаллизующимися кальцитом и доломитом. В результате флюид резко обогащался  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Такой же процесс предполагается в континентальных оливинсодержащих породах (как правило, под влиянием флюидов с гораздо меньшей температурой — вплоть до  $100\text{--}200^\circ\text{C}$ ). Восходящий над серпентинизированными породами поток восстановленных горячих флюидов переносит микроскопические частицы металлов, сульфидов и карбонатов — сложный комплекс, совершенно чужеродный породам, в которых формируется залежь УВ. Такая метка указывает на происхождение флюида.

В серпентинитах, через которые про-

ходит флюид, присутствует остаточный аваруит, состав которого иллюстрируют данные табл. 3. Размеры включений составляют до 3—20 мкм. Встречаются включения пентландита и хизлевудита (5 мкм) шпинели [Базылев, 2000]. Микропрорастаниями представлена часть кальцита и доломита в серпентине. В основно-ультраосновных комплексах континентов "... около 15% сульфидов находится в зернах размером менее 2—5 мкм, представляя нано- и микрочастицы ..." [Раскаев и др., 2009, с. 635]. Отчасти мелкие зерна образуют хромит (с примесями Al и Mg, реже Mn, Ti, V), Pt (и платиноиды), Au, SnO<sub>2</sub>, TiO. Касситерит включает вкрапленность Ti, Nb, Ta, Fe, Cr, V, W размером 1—100 мкм. При метаморфизме пироксенов (баститизации) из породы выносятся хром и алюминий.

Комплекс чужеродных микро- и нано-

**Т а б л и ц а 3. Содержания элементов в некоторых рудных минералах серпентинитов СОХ [Базылев, 2000]**

Элемент	Содержание, %		
	Аваруит	Пентландит, хизлевудит	Шпинель
S	0,12	33,39	—
Ni	74	44,22	—
Fe	24	20,39	29
Cu	1	0,07	—
Co	0,7	1,47	—
Zn	0,04	0,01	0,2
Pb	0,04	0,02	—
O	—	—	19
Ti	—	—	0,3
Al	—	—	6
Mn	—	—	1
Mg	—	—	4,5
Cr	—	—	35
V	—	—	0,1

частиц обнаружен в последнее время в залежах УВ разных регионов [Лукин, 2009]. Соотношение их концентраций, наблюдаемое, в частности, в Днепровско-Донецкой впадине преимущественно в темном пелитовом веществе [Лукин, 1997; Очерки ..., 2018], не может быть спрогнозировано, так как не изучены начальные пропорции (непосредственно после захвата частиц флюидом), изменения при транспортировке (размеры частиц различаются до двух порядков), изменения по пути состава флюида, преобразования водорода в УВ и осаждения. "Различие в режимах метаморфизма океанических и офиолитовых (в широком смысле термина ...) перидотитов проявлено также и в том, что некоторые минеральные ассоциации, обычные в офиолитовых перидотитах и развивающиеся при низких отношениях вода/порода, такие как брусит + серпентин, антигорит + оливин, кальцит + серпентин, доломит + серпентин, диопсид + серпентин, в океанических перидотитах либо не известны, либо проявлены очень ограниченно" [Базылев, 2000]. Можно констатировать только совпадение общего характера состава прогнозируемых и наблюдаемых включений (в частности, распространенность самородного железа и никеля), но и это представляется существенным аргументом в пользу принятой гипотезы образования флюида.

Экспериментальные работы по получению водорода при серпентинизации основных и ультраосновных пород проведены для давлений, соответствующих глубинам 5—20 км и 25—400 °С [Дмитриев и др., 1999]. Для природного процесса в коре СОХ (термальное поле Рейнбоу) установлена близкая минимальная глубина и диапазон  $T=350\div 500$  °С [Barriga et al., 1997].

По данным для центральной части Украинского щита на современном эрозионном срезе встречаются преимущественно серпентинизированные гипербазиты мощностью 0,1—3 км [Ультрабазитовые ..., 1979]. С глубиной их количество должно увеличиваться. Некоторые массивы содержат графит. Таким образом, гипотеза

корового происхождения УВ представляется реальной. Проблемой, для анализа которой необходимы дополнительные исследования, остается темп рассмотренных процессов генерации водорода и синтеза углеводородов в реальных условиях активизированной коры. Некоторым аргументом в пользу достаточного темпа генерации водорода могут служить данные работы [Welhan et al., 1979] о том, что в рифтовых долинах СОХ за год возникает  $1,3 \times 10^9 \cdot \text{м}^3 \text{H}_2$ ,  $0,16 \cdot 10^9 \cdot \text{м}^3 \text{CH}_4$ . Если отнести эти объемы к сравнительно небольшим площадям гидротермальных полей, синхронно существующих на осях СОХ в течение  $10^3$ — $10^6$  лет [Краюшкин, 2008], то темп генерации водорода можно признать (на уровне имеющейся информации) достаточным.

При отсутствии на пути поднимающегося водорода достаточного количества углерода УВ не возникает и на глубине, где водород еще не окислен приповерхностным кислородом, в зоне СА должны встречаться аномальные концентрации  $\text{H}_2$ . Возможно, именно так дело обстоит в Нагольном кряже [Мурич и др., 1975]. Напротив, в коре, меридионально пересекающей Украинский щит Кировоградской зоны активизации, только наличие графита дает возможность объяснить интенсивно проводящий объект [Гордиенко и др., 2005]. Над ним в верхней коре фиксируются газовые струи, в которых водорода 15%, УВ 70% [Войтов, 1974]. Концентрации невелики, но в подземных водах этого района на глубине до 1 км фоновое содержание растворенного метана близко к нулю. Та же зона в Днепровско-Донецкой впадине и на мысе Тарханкут газоносна, ее дальнейшее изучение кажется интересным.

**Флюиды верхней мантии.** Прямая информация о флюидах верхней мантии (по составу выплавов и выносимых ксенолитов) ограничена глубинами 200—250 км [Рябчиков и др., 1982, 1985; Соловова, 2004; Киссин, 2001; Коваленко и др., 2006 и др.]. Несмотря на довольно большое разнообразие данных, преобладает мнение о ничтожности их концентрации. Например, по

И.Г. Киссину: "Вода и углекислота являются основными компонентами мантийных летучих, которые содержат также  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и некоторые другие соединения. Количественные оценки показывают средние содержания в современной мантии  $\text{H}_2\text{O}$  — 0,014 мас. %,  $\text{CO}_2$  — 0,002 мас. %, остальные летучие присутствуют в еще меньших концентрациях. Экспериментально установлено, что в *PT*-условиях мантии алюмосиликаты обладают высокой растворимостью во флюидах, вследствие чего возможен постепенный переход высококонцентрированных водных растворов в богатые водой силикатные расплавы. При этом исчезает резкая граница между процессами магматического и флюидного массопереноса. Сделано заключение об устойчивости водных флюидов в значительном интервале глубин субконтинентальной мантии и о резком преобладании магматической формы транспортировки флюидов из мантии в земную кору" [Киссин, 2001, с. 9]. Мнение довольно близкое к приведенному выше [Азбель, Толстихин, 1988].

Результат выполненного автором обобщения некоторых данных, не претендующего на полное освещение проблемы (около 100 значений), приведен на рис. 7.

Получена средняя величина 0,022 вес.%. Присутствуют существенные различия в водосодержании минералов, особенно пе-

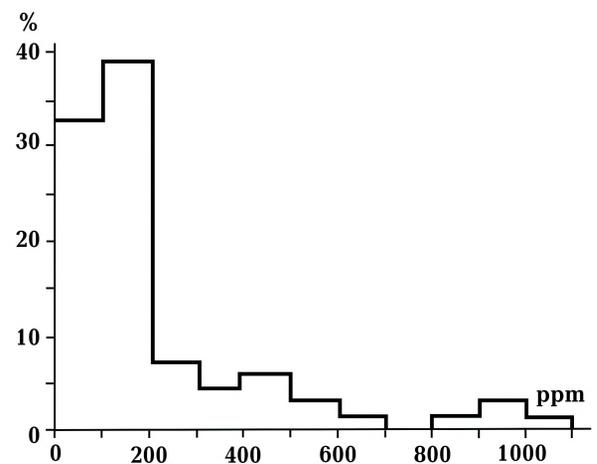


Рис. 7. Гистограмма распределения содержания воды в породах верхней мантии Земли.

ридотитовой и эклогитовой ассоциаций. Именно последние послужили основой для встречающихся в литературе утверждений, что в мантии находится количество воды, равное содержащемуся в океане. При использовании для расчета средней концентрации мантийной воды почти на порядок меньше, чем океанической. Подобная информация о существенно большем содержании летучих на больших глубинах (не основанная на экспериментах с реальными образцами пород мантии) свидетельствует о возможности их включения в структуру минералов мантийных пород при высоких давлениях, а не о фактическом нахождении флюидов.

Геофизические и геологические данные о магматических очагах в верхней мантии [Гордиенко, 2017 и др.] указывают на их мощность порядка 50 км. Даже при полном извлечении мантийных флюидов из такого объекта (что практически нереально) за их счет нельзя получить существенную добавку к флюидам коры.

Максимальной концентрации флюидов можно ожидать в очагах плавления под корой вулканических районов. Под вулканами южной Камчатки на глубинах около 70—120 км при построении 3D геоэлектрической модели обнаружены проводники, для объяснения которых необходима концентрация флюидов до 0,1—0,6%. В коре встречаются значения до 2,0—2,5% [Белявский и др., 2014].

Поступление материала из нижней мантии и/или с границы нижней мантии и ядра петрологически недоказуемо, это чисто умозрительная конструкция. “Петрологические доказательства самого глубокого поступления вещества на поверхность ограничиваются верхними горизонтами нижней мантии (~650—700 км), т. е. глубиной самых глубоких землетрясений. Включения ферропериклаза в некоторых алмазах не опровергают вовлечение и более глубоких горизонтов мантии, однако не дают этому однозначного подтверждения. Геохимические данные также не дают однозначного подтверждения вовлечения вещества нижней мантии в процес-

сы магмогенерации под вулканически активными районами. В то же время они свидетельствуют о полной вещественной изоляции ядра от верхнемантийных процессов” [Иванов, 2010, с. 87].

В качестве аргументов в пользу мощных потоков флюидов через верхнюю мантию используют сведения об аномалиях пониженных скоростей и повышенной электропроводности. Автор принимал участие в построении скоростных моделей верхней мантии и обобщении результатов таких же данных, полученных другими геофизиками. Рассмотрены скоростные разрезы активизированных и неактивизированных платформ, альпийских геосинклиналей, рифтов, океанических котловин, СОХ, глубоководных желобов, островных дуг и задуговых впадин [Гонтовая, Гордиенко, 2006; Gordienko, Gordienko, 2016; Гордиенко, 2017; Гордиенко, Гордиенко, 2017 и др.]. Для всех регионов построены скоростные модели, соответствующие схемам глубинных процессов по АПГ. Они сопоставлены с экспериментальными. Во всех случаях достигнуто согласование, различия не превышают обусловленных погрешностями эксперимента и расчета. Ни в одном из случаев не понадобилось вводить эффекты, связанные с мантийными флюидами (см. рис. 4, 8).

Различия между разрезами платформы и активных регионов явно указывают на адвективный характер процесса теплопереноса в мантии. Среднее расхождение между расчетными и экспериментальными моделями составляет около 0,1 км/с, что указывает на погрешность примерно 0,07 км/с. Такой результат следует признать вполне удовлетворительным.

Для аномалий электропроводности получена та же картина, но материал пока ограничен, изучение этих объектов необходимо продолжить.

**Флюиды нижней мантии и ядра.** Для этой части концепции ДЗ приходится рассматривать только предположения, с точки зрения автора, в основном невероятные.

В последние годы обнаружение включений в сверхглубинных алмазах и раз-

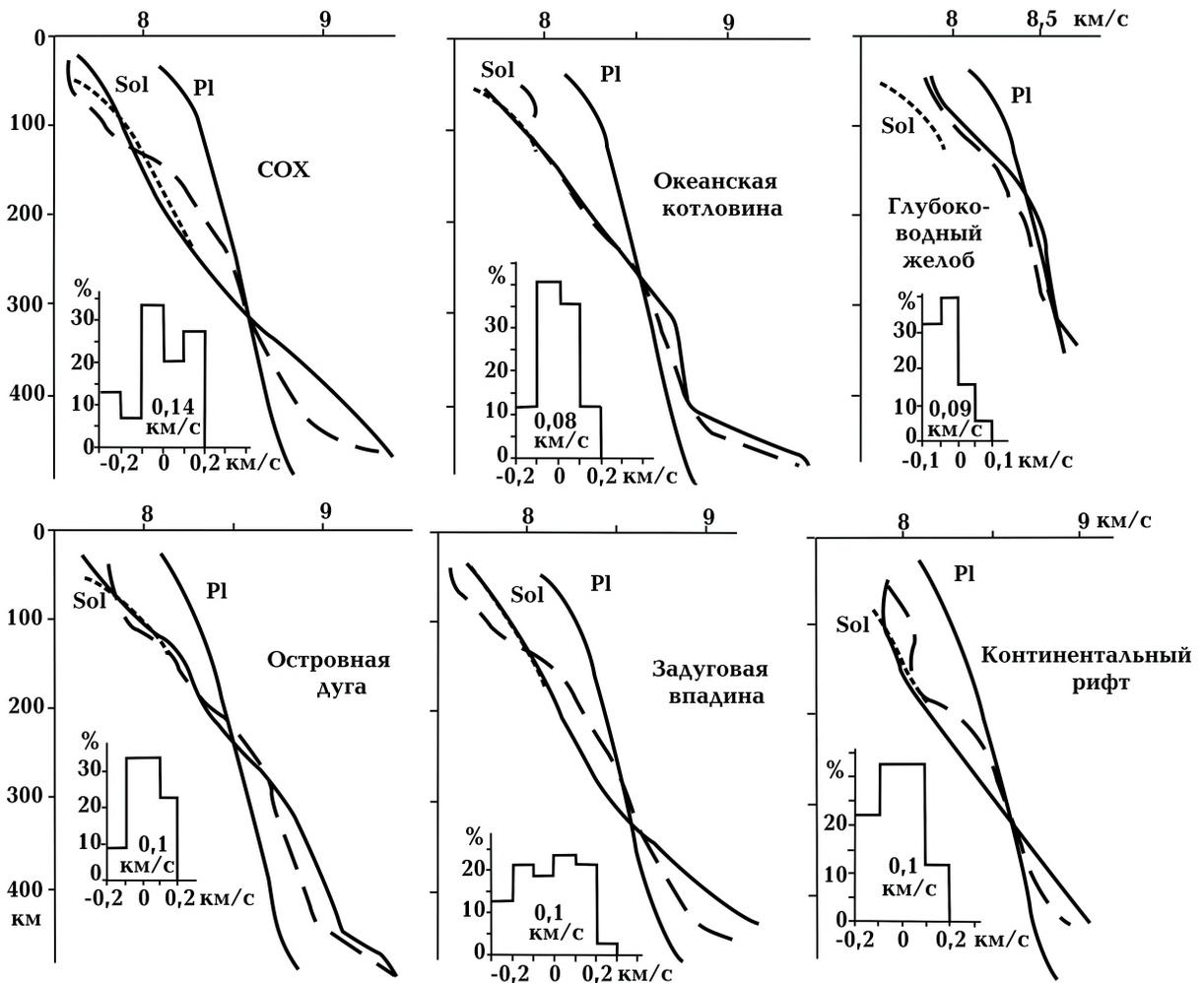


Рис. 8. Скоростные разрезы верхней мантии регионов с разными типами эндогенных режимов. Штриховая линия относится к разрезам, рассчитанным по представлениям АПГ. Sol — температура начала плавления пород мантии, PL — разрез неактивной платформы.

витие методик моделирования в *PT*-условиях нижней мантии [Collerson et al., 2000; Рябчиков, Каминский, 2013; Зедгенизов и др., 2015 и др.] позволили рассмотреть вероятную минералогию пород нижней части переходной зоны между мантиями и ее изменение вплоть до поверхности ядра. Химический и минеральный состав вещества принципиально не отличается от спрогнозированного А. Рингвудом. Невозможно выделить его часть, которая к настоящему времени по каким-то причинам должна экзотермически разделиться, чтобы обеспечить погружение одних фрагментов в ядро и поднятие других сквозь нижнюю и верхнюю мантию. Построенная ав-

тором тепловая модель верхней мантии и переходной зоны к нижней без подбора согласуется со всей геологической историей, радиогенной теплогенерацией, данными геотермометров. Температура глобальной астеносферы у кровли нижней мантии составляет в этой модели  $2600 \pm 150$  °C на глубине около 800 км. Принятая в настоящее время температура внутри слоя D у кровли ядра —  $3700 \pm 400$  °C на глубине около 2800 км [Anzellini et al., 2013; Terasaki, Fischer, 2016; Harmand et al., 2014 и др.]. Адиабатический градиент для нижней мантии оценивается как 0,3—0,5 °C/км [Terasaki, Fischer, 2016, Harmand et al., 2014 и др.]. Объект, перемещающий-

ся между указанными границами, потеряет большую часть аномальной температуры только за счет адиабатического охлаждения. Если учесть его "размазывание" по площади в пропорции 2,5:1, то какой-либо перенос энергии полностью исключается.

Тем не менее гипотетические газовые струи огромных масштабов якобы обнаруживаются в нижней мантии вплоть до границы ядра по сейсмологическим дан-

ным. Такие утверждения широко распространены, поэтому стоит на них остановиться подробнее. Это удобно сделать на примере региона, отличающегося очень значительными скоростными аномалиями в мантии и известного автору лучше других. Речь идет о переходной зоне от северо-восточной окраины Евразии к Тихому океану (рис. 9).

В этом регионе многократно проводились сейсмотомографические исследова-

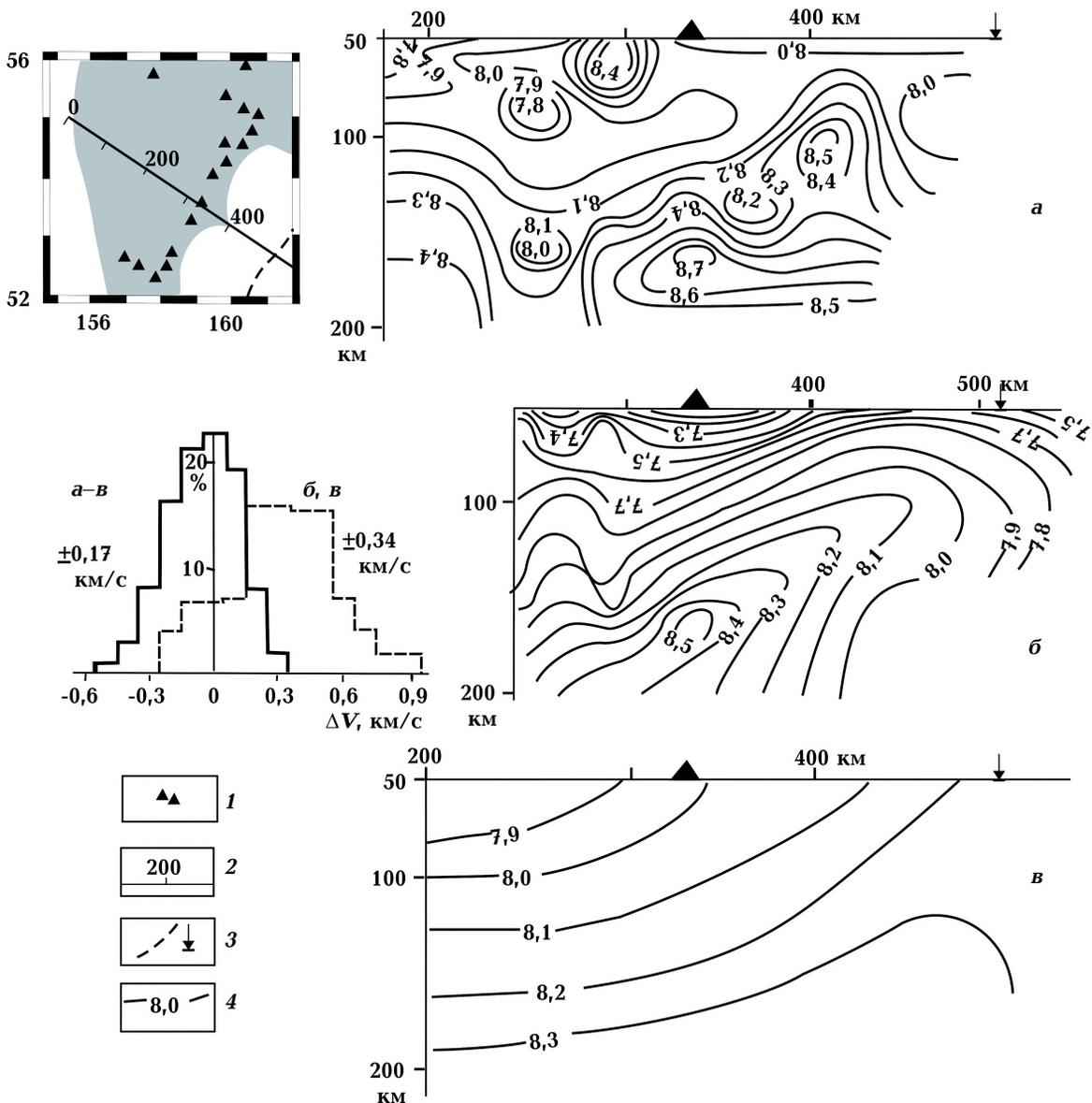


Рис. 9. Скоростные модели верхней мантии Камчатки и прилегающей акватории по данным: а — [Гонтовая, Гордиенко, 2006], б — [Gorbatov et al., 1999], в — [Жао и др., 2010]; 1 — вулканы, 2 — линия профиля, 3 — ось глубоководного желоба, 4 — изолинии скорости.

ния, ориентированные на большие глубины в мантии, иногда вплоть до поверхности ядра. В частности, один из профилей, иллюстрирующих фрагмент трехмерной модели [Жао и др., 2010], приведен на рис. 9 вместе с моделями других авторов. Последние построены для меньшего диапазона глубин. Оценки погрешности построения скоростных моделей авторами таких работ обычно включают тесты, результаты которых далеки от выявления реальных ошибок. А без их знания невозможно определить достоверность выделяемых аномалий. Обычным приемом установления погрешности является сопоставление результатов повторных экспериментов. Применим его и в данном случае.

Для разреза I такое сопоставление проводилось ранее, причем сравнивались скоростные разрезы, полученные как часть трехмерной томографической модели для всей Восточной Камчатки или как средний для этой территории, построенный по схеме глубинного процесса в соответствии с АПГ. Среднее расхождение составило 0,12 км/с, что при равенстве ошибок каждого из методов указывает на погрешность около 0,08 км/с. При сравнении разрезов I и III среднее расхождение составляет 0,17 км/с, соответственно ошибка построения разреза III — 0,15 км/с. При сравнении разрезов II и III расхождение 0,34 км/с, ошибка разреза II — 0,31 км/с. Но это некорректная оценка. Смещение максимума гистограммы на 0,4 км/с требует исключения разреза II из рассмотрения: он получен с грубой ошибкой в распределении средних скоростей на глубинах расчета.

Полный разрез III [Жао и др., 2010], проходящий на Камчатке по профилю, показанному на рис. 9, тянется от Северо-Западной плиты Тихого океана до Виллойского прогиба (рис. 10).

Аномалии, выделенные в нижней мантии, достигают 0,5 %, в абсолютных величинах —  $0,05 \div 0,07$  км/с. Их достоверное выделение при погрешности модели в 0,15 км/с нереально. Они не могут служить доказательством существования неких объектов, природу которых имеет

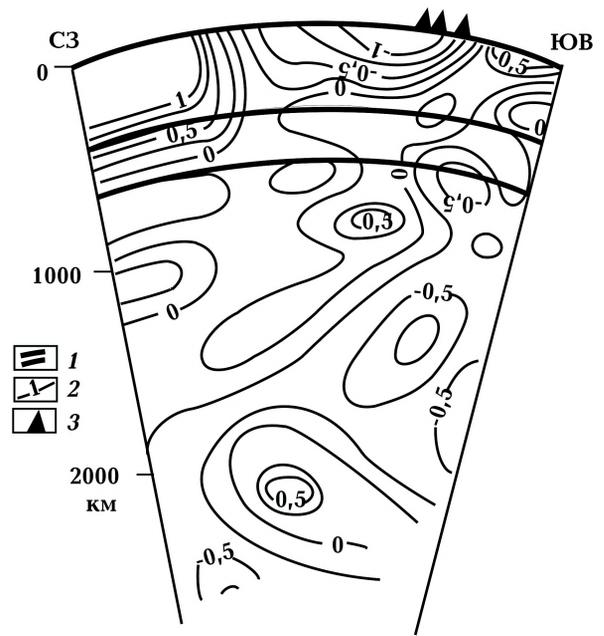


Рис. 10. Аномальные (в %) значения скорости  $P$ -волн в верхней и нижней мантии по профилю через окраину Тихого океана и Тихоокеанский складчатый пояс: 1 — переходная зона между верхней и нижней мантией, 2 — изолинии аномальной скорости, 3 — вулканы Камчатки.

смысл рассматривать. Кроме того, если эти скоростные возмущения и существуют, то им соответствуют плотностные на уровне  $0,01\text{—}0,02$  г/см<sup>3</sup>, скорее всего, недостаточные для запуска процедуры теплопереноса. Не стоит сбрасывать со счетов и факт отсутствия землетрясений в нижней мантии. Ведь их наличие активно используется как доказательство движения вещества Земли в верхней мантии (хотя это и не всегда верно).

Рассмотренная ситуация — не исключение. В работе [Gu et al., 2003] изучена изменчивость скорости в мантии вплоть до кровли ядра для регионов, где она представляется максимально возможной — на контактах Тихого океана с континентами (рис. 11).

Очевидно, что в нижней мантии вариации скорости практически отсутствуют. Некоторое их увеличение начинается у границы ядра. Это не удивительно: перепад скорости на поверхности ядра 5,7 км/с. Достаточно незначительных изменений глу-

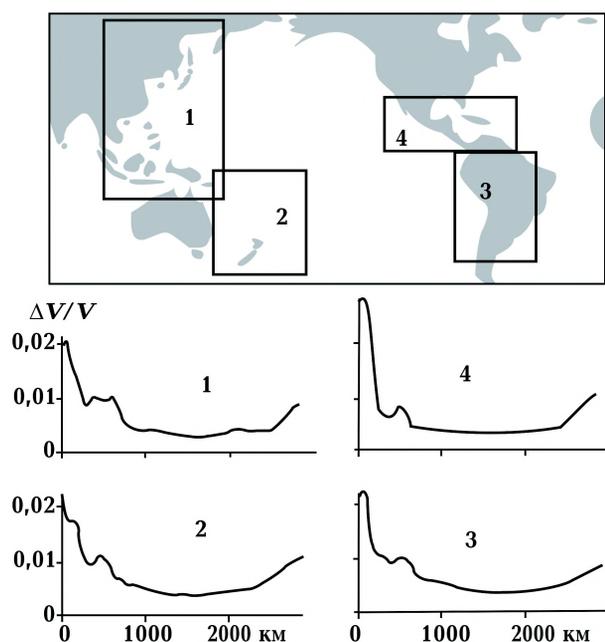


Рис. 11. Изменчивость скорости в оболочке Земли на периферии Тихого океана.

бины границы для появления ярко выраженных аномальных объектов. Вариации на уровне 1 % и менее при контрасте более 50 % указывают, скорее всего, на небольшие по размеру неоднородности.

Можно констатировать, что подтверждение сейсмологических данными представлений о процессах в нижней мантии и на границе ядра отсутствует.

**Заключение.** Проведенное рассмотрение проблем ДЗ с привлечением элементов адвекционно-полиморфной гипотезы обнаруживает не только разнородность ее частей, но и принципиальные различия в подходе к анализу геолого-геофизической информации в рамках двух концепций.

В разработанной автором гипотезе для изучения геологических явлений и аномалий геофизических полей используется представление о конкретном, количественно описанном источнике энергии и ее балансе в течение последних 4,2 млрд лет, основанное на экспериментальных данных. Это позволяет для любого района и периода геологической истории рассчитать любые явления и на количественном уровне сравнить их с наблюдаемыми. Рас-

хождения не превышают обусловленных погрешностями эксперимента и вычисления. Естественно, сказанное касается эмпирических данных, для которых достигнут количественный уровень изученности. Такая же операция выполняется для аномалий физических полей. Для древних платформ с длительно отсутствовавшим теплопереносом установлено распределение физических свойств вещества коры (с учетом результатов ГСЗ) и верхней мантии по химическому и минеральному составу пород, температуре и давлению. Для активных регионов рассчитываются отклонения физических свойств пород коры и мантии от присущих древней платформе. В сейсмологии и геоэлектрике построенные таким образом модели непосредственно сравниваются с экспериментальными, в гравиметрии и геотермике — через решение прямых задач. Во всех случаях без подбора параметров достигается согласование, расхождения связаны только с ошибками. Возможность таких операций продемонстрирована для всех типов эндогенных режимов континентов, океанов и переходных зон, основных видов месторождений полезных ископаемых [Гордиенко, 2017 и др.].

Для ДЗ это можно сделать только при анализе процесса одной группой авторов [Азбель, Толстихин, 1988; Толстихин, 1991; Толстихин и др., 2012 и др.]. Результат не противоречит АПГ. В других вариантах схемы дегазации, претендующие на обеспечение ею глубинных процессов в коре и мантии, энергетически обеспечивающих основные события геологической истории, базируются в лучшем случае на качественных оценках. Такие построения не допускают реального контроля. Часто лежащие в их основе предположения не согласуются с известными фактами.

Сказанное не следует рассматривать как отрицание явления ДЗ или утверждение о неактуальности ее изучения. Полученные результаты интересны и важны прежде всего для разработки моделей образования многих типов месторождений полезных ископаемых. Существенный вклад

вносят эти исследования в решение экологических задач. Автор практически не останавливался на них, сосредоточившись

на проблемах геодинамики. Здесь представления многих исследователей ДЗ кажутся несостоятельными.

### Список литературы

- Азбель И., Толстихин И. Ранняя эволюция Земли. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1988. 42 с. (Препр.).
- Александров А. Л., Гордиенко В. В., Деревская Е. И., Земсков Г. А., Иванов А. П., Панов Б. С., Шумлянский В. А., Эпов О. Г. Глубинное строение, эволюция флюидно-магматических систем и перспективы эндогенной золотоносности юго-восточной части Украинского Донбасса. Киев: Изд. Инта фундаментальных исследований, 1996. 74 с.
- Бабинец А. Е., Ветштейн В. Е. Результаты изучения содержания  $O^{18}$  в некоторых генетических разновидностях природных вод. В кн.: *Проблемы гидрогеологии и инженерного грунтоведения*. Киев: Наук. думка, 1967. С. 11—21.
- Базылев Б. А. Развитие аваруитсодержащей минеральной ассоциации в перидотитах из зоны разлома  $15^{\circ} 20'$  (Атлантический океан) как одно из проявлений океанического метаморфизма. *Науки о Земле*. 2000. Т. 2. № 3. <http://eos.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v02/rje00045/rje00045.htm>.
- Белов С. В. Чистое топливо будущего — водород. *Природно-ресурсные ведомости*. 2003. Вып. 47. С. 8.
- Белов С. И., Борисков Г. В., Быков А. И., Ильякаев Р. И., Лукьянов Н. Б., Матвеев А. Я., Михайлова О. Л., Селемир В. Д., Симаков Г. В., Трунин Р. Ф., Трусов И. П., Урлин В. Д., Фортвов В. Е., Шуйкин А. Н. Ударно-волновое сжатие твердого дейтерия. *Письма в ЖЭТФ*. 2002. Т. 76. Вып. 7. С. 508—510.
- Белявский В. В., Алексанова Е. Д. Трехмерная геоэлектрическая модель южной части полуострова Камчатка. *Физика Земли*. 2014. № 1. С. 11—32.
- Войтов Г. І. До оцінки інтенсивності газового обміну на щитах (на прикладі Українського щита). *Геол. журн.* 1974. № 2. С. 68—82.
- Войтов Г. И., Рудаков В. П. Водород атмосферы подпочвенных отложений, его мониторинг и прикладные возможности. *Физика Земли*. 2000. № 6. С. 83—91.
- Гальперин А. М., Зайцев В. С., Харитоненко Г. М., Норватов Ю. А. Геология: Ч. 3. Гидрогеология: Учебник для вузов. Москва: Горная книга, 2009. 400 с.
- Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. Ред. В. М. Сутробов. Москва: Наука, 1986. 209 с.
- Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В. Глубинные процессы и геофизическая модель мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2006. № 2. С. 107—121.
- Гордиенко В. В. Тепловые процессы, геодинамика, месторождения. 2017. [https://docs.wixstatic.com/ugd/6d9890\\_090e4a0466b94934b7d7af8c751a70bf.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/6d9890_090e4a0466b94934b7d7af8c751a70bf.pdf).
- Гордиенко В. В. О движении литосферных плит в океанах и переходных зонах. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 3. С. 149—166. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i3.2018.137181>.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). Киев: Корвін пресс, 2005. 210 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко Л. Я. Скоростная модель подкорковой мантии Украины. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 6. С. 30—51.

- <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151004>.
- Гордиенко В.В., Гордиенко Л.Я. Скоростные модели верхней мантии континентальных и океанических рифтов. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 6. С. 20—40. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i6.2017.116365>.
- Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Ред. А.Н. Дмитриевский, Б.М. Валяев. Москва: ГЕОС, 2002. 471 с.
- Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Углеводороды и жизнь. Ред. А.Н. Дмитриевский, Б.М. Валяев. Москва: ГЕОС, 2010. 712 с.
- Дмитриев Л.В., Базылев Б.А., Борисов М.В., Буго А., Силантьев С.А., Соколов С.Ю. Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти. *Науки о Земле.* 1999. Т. 1. № 6. 511—519.
- Друзьяк Н.Г. Защищает ли нас озоновый слой? 2013. [http://www.telenir.net/alternativnaja\\_medicina/kak\\_prodlit\\_bystrotechnuyu\\_zhizn/index.php](http://www.telenir.net/alternativnaja_medicina/kak_prodlit_bystrotechnuyu_zhizn/index.php).
- Жао Д., Пираино Ф., Лиу А. Структура и динамика мантии под восточной Россией и прилегающими регионами. *Геология и геофизика.* 2010. № 9. С. 1188—1203.
- Заварицкий А.Н. Изверженные горные породы. Москва: Изд-во АН СССР, 1961. 480 с.
- Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С., Панин А.В., Евтушенко О.В., Рагозин А.Л., Каги Х. Свидетельства фазовых переходов минеральных включений в сверхглубинных алмазах из месторождения Сао-Луис (Бразилия). *Геология и геофизика.* 2015. Т. 56. № 1-2. С. 384—396.
- Иванов А.В. Глубинная геодинамика: границы процесса по геохимическим и петрологическим данным. *Геодинамика и тектонофизика.* 2010. № 1. С. 87—102.
- Киссин И.Г. Флюидная система и геофизические неоднородности консолидированной земной коры континентов. *Вестник ОПТГН РАН.* 2001. № 2 (17). С. 1—22.
- Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В., Дорофеева В.Л., Ярмолюк В.В. Оценка средних содержаний  $H_2O$ , Cl, F, S в деплетированной мантии на основе составов расплавных включений и закалочных стекол срединно-океанических хребтов. *Геохимия.* 2006. № 3. С. 243—266.
- Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. Ред. Е.А. Козловский. Москва: Недра, 1984. 490 с.
- Краюшкин В.А. Небиогенная нефтегазоносность современных центров спрединга дна Мирового океана. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана.* 2008. № 3. С. 19—39.
- Литасов К.Д., Шацкий А.Ф. Современные представления о составе ядра Земли. *Геология и геофизика.* 2016. Т. 57. № 1. С. 31—62.
- Ломизе М.Г. Вулканическое кольцо Тихого океана: его прошлое, настоящее и будущее. *Соросовский образовательный журнал.* 1999. № 9. С. 59—66.
- Лукин А.Е. Литолого-динамические факторы нефтегазоаккумуляции в авлакогенных бассейнах. Киев: Наук. думка, 1997. 224 с.
- Лукин А.Е. Самородные металлические микро- и нановключения в формациях нефтегазоносных бассейнов — трассеры суперглубинных флюидов. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 2. С. 61—92.
- Менард Г.У. Геология дна Тихого океана. Москва: Мир, 1966. 274 с.
- Мурич А.Т., Резников А.И., Абражевич Э.В., Сердюков В.В. Результаты глубокого бурения в центральной части Донбасса. *Сов. геология.* 1975. № 8. С. 125—131.
- Набоко С.И. Советская вулканология. *Вопросы географии Камчатки.* 1967. Вып. 5. С. 12—17.
- Очерки дегазации Земли. Ред. В.М. Шестопалов. Киев: Итек сервис, 2018. 632 с.

- Ракаев А. И., Нерадовенкий Ю. Н., Черноусенко Е. В., Морозова Т. А. Минералогическо-технологические исследования бедных серпентинитовых медно-никелевых руд Печенгского рудного поля. *Вестник МГУ*. 2009. Т. 12. № 4. С. 632—637.
- Ретеюм А. Ю. Глубинная дегазация Земли как ведущий эндогенный процесс: *Тр. Междунар. конф. "Дегазация Земли: геология и экология — 2018", 24—26 апреля 2018 г., Москва*. [http://oilgasjournal.ru/issue\\_23/reteyum.pdf](http://oilgasjournal.ru/issue_23/reteyum.pdf).
- Ритман А. Вулканы и их деятельность. Москва: Мир, 1964. 438 с.
- Рябчиков И. Д. Водные растворы в верхней мантии и проблемы дегазации Земли. В кн.: *Подземные воды и эволюция литосферы*. Т. 1. Москва: Наука, 1985. С. 176—187.
- Рябчиков И. Д. Флюидный массоперенос и мантийное магмообразование. *Вулканология и сейсмология*. 1982. № 5. С. 3—9.
- Рябчиков И. Д., Каминский Ф. В. Состав нижней мантии по данным минеральных включений в алмазах. *Докл. РАН*. 2013. Т. 453. № 5. С. 540—543.
- Савко А. Д., Надежка Л. И., Шевырев Л. Т. Новые данные о флюидной и сейсмической активности Воронежской антеклизы. В кн.: *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы*. Москва: ГЕОС, 2008. С. 439—441.
- Соловова И. П. Мантийные магмы и флюиды по результатам изучения включений в минералах: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Москва: ИГЕМ РАН, 2004. 335 с.
- Старостин В. И., Игнатов П. А. Геология полезных ископаемых. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 477 с.
- Толстихин И. Н. Ранняя эволюция Земли: ограничения, следующие из анализа изотопных геохронометрических систем. *Физика Земли*. 1991. № 8. С. 73—90.
- Толстихин И. Н., Марти Б., Почели Д., Гофман А. Дегазация Земли: модели, основанные на ксенологии. Аннотации докладов 14-го семинара ИКИ РАН. 2012. <http://www.iki.rssi.ru/galeev/past2012.htm>.
- Ультрабазитовые формации центральной части Украинского щита. Ред. Н. П. Семененко. Киев: Наук. думка, 1979. 412 с.
- Федорин Я. В. Модель эволюции ранней Земли. Киев: Наук. думка, 1991. 112 с.
- Ферхуген Дж. Метаморфические реакции и метаморфические фации. Москва: Иностр. лит., 1962. 414 с.
- Шумлянский В. А. Киммерийская металлогеническая эпоха на территории Украины. Киев: Наук. думка, 1983. 220 с.
- Шумлянский В. А. Тектонические условия киммерийской эпохи рудообразования на Восточно-Европейской платформе. В сб.: *Наукові праці Інституту фундаментальних досліджень*. Киев: Логос, 2007. С. 50—68.
- Юрова М. П. Дегазация вулканов. *Актуальные проблемы нефти и газа: Тр. Междунар. конф. "Дегазация Земли: геология и экология — 2018", 24—26 апреля 2018 г., Москва*. 2018. Вып. 4 (23). doi: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art63.
- Anzellini, S., Dewaele, A., Mezouar, M., Loubeyre, P., & Morard, G. (2013). Melting of Iron at Earth's Inner Core Boundary Based on Fast X-ray Diffraction". *Science*, 340, 464—466. doi: 10.1126/science.1233514.
- Badro, J., Côté, A., & Brodholt, J. (2014). A seismologically consistent compositional model of Earth's core. *Proceedings of NAS USA*, 111 (21), 7542—7545. <https://doi.org/10.1073/pnas.1316708111>.
- Barriga, F., Costa, I., Relvas, J., Ribeiro, A., Fouquet, Y., Ondreas, H., & Parson, L. (1997). The Rainbow serpentinites and serpentinite-sulphide stockwork (Mid-Atlantic Ridge, AMAR segment): A preliminary report of the Flores results. *EOS*, 78 (46), F832.
- Clesi, V., Bouhifd, M., Bolfan-Casanova, N., Manthilake, G., Schiavi, F., Raepsaet, C., Bureau, H., Khodja, H., & Andrault, D. (2018). Low hydrogen contents in the cores of terres-

- trial planets. *Science Advances*, 4 (3), 1—6. doi: 10.1126/sciadv.1701876.
- Collerson, K., Hapugoda, S., Kamber, B., & Williams, Q. (2000). Rocks from the Mantle Transition Zone: Majorite-Bearing Xenoliths from Malaita, Southwest Pacific. *Science*, 288, 1215—1223. doi: 10.1126/science.288.5469.1215.
- Douglass, A., & Fioletov, V. (Eds.). (2011). *Stratospheric Ozone and Surface Ultraviolet Radiation. Scientific Assessment of Ozone Depletion*. WMO, 80 p.
- Giggenbach, W. (1997). The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. In H. Barnes (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (pp. 737—796). New York: J. Wiley.
- Gilat, A., & Vol, A. (2012). Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geoscience Frontiers*, 3 (6), 911—921. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.009.
- Gorbatov, A., Domínguez, J., Suarez, G., Kostoglodov, V., Zhao, D. & Gordeev, E. (1999). Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula. *Geophysical Journal International*, 137(2), 269—279. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.101-1-00801.x.
- Gordienko, L., & Gordienko, V. (2016). P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NCGT Journal*, (3), 389—405.
- Gu, Y., Dziewonrski, A., & Ekström, G. (2003). Simultaneous inversion for mantle velocity and topography of transition zone discontinuities. *Geophysical Journal International*, 154(2), 559—583. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01967.x.
- Iizuka-Oku, R., Yagi, T., Gotou, H., Okuchi, T., Hattori, T., & Sano-Furukawa, A. (2017). Hydrogenation of iron in the early stage of Earth's evolution. *Nature Communications*, 8, 14096. https://doi.org/10.1038/ncomms14096.
- Harmand, M., Ravasio, A., Mazevet, S., Bouchet, J., Denoeud, A., Dorchies, F., Feng, Y., Fourment, C., Galtier, E., Gaudin, J., Guyot, F., Kodama, R., Koenig, M., Lee, H. J., Miyaniishi, K., Morard, G., Musella, R., Nagler, B., Nakatsutsumi, M., Ozaki, N., Recoules, V., Toileikis, S., Vinci, T., Zastrau, U., Zhu, D., & Benuzzi-Mounaix, A. (2014). Melting of iron close to Earth's inner core boundary conditions and beyond. https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1411/1411.2074.pdf.
- Menaker, G. (2011). *Theoretical models in geochemistry and ore genesis*. Chicago: Lulu Press, 271 p.
- Kukkonen, I. T. (Ed.). (2011). *Outokumpu Deep Drilling Project 2003—2010*. Geological Survey of Finland, Special Paper 51, 252 p.
- Ozone and UV-radiation*. (2009). Blindern: University of Oslo, 73 p. https://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/nedlagte-emner/FYS3610/h09/undervisningsmateriale/compendium/Ozone\_and\_UV\_2009.pdf.
- Sakami, T., Ohtani, E., Fukui, H., Kamada, S., Takahashi, S., Sakairi, T., Takahata, A., Sakai, T., Tsutsui, S., Ishikawa, D., Shiraishi, R., Seto, Y., Tsuchiya, T., & Baron, A. (2016). Constraints on Earth's inner core composition inferred from measurements of the sound velocity of hcp-iron in extreme conditions. *Science Advances*, 2 (2), e1500802. doi: 10.1126/sciadv.1500802.
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2011). *Volcanoes of the World*. University of California Press, 2011. 568 p.
- Terasaki, H., & Fischer, R. (Eds.). (2016). *Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core*. Hoboken: J. Wiley & Sons, 312 p.
- Welhan, J., & Grain, H. (1979). Methane and hydrogen in East Pacific rise hydrothermal fluids. *Geophysical Research Letters*, 6 (11), 829—831. https://doi.org/10.1029/GL006i011p00829.
- Zhang, Y., Sekine, T., He, H., Yu, y., Liu, F., & Mingjian Zhang, M. (2016). Experimental constraints on light elements in the Earth's outer core. *Scientific Reports*, 6, Article: 22473. https://doi.org/10.1038/srep22473.

# About degassing of the Earth

V. V. Gordienko, 2019

Degassing of the Earth has attracted great attention of geologists in recent years. The range of opinions on various aspects of the problem is very large. Some of them from the author's point of view are based on unreasonable assumptions or misinterpreted facts. The article attempts to consider briefly the most controversial aspects of the concept, using analytical methods, the possibility of which gives the application of the advection-polymorphic hypothesis, and some results obtained with its help. It was necessary to bring data on heat and mass transfer in the tectonosphere, for which the determining influence on geodynamics was proved. The main attention is paid to the amount of transported matter and energy consumed by deep processes. It is shown that the parameters of the mass flow transferring the gas component from the mantle to the crust and the atmosphere established by isotope-geochronometric data and the scheme of deep processes in the hypothesis used are identical. The parameters of the degassing process under magmatism and circulation of fluids during the formation of deposits of ores and hydrocarbons are considered. It is shown that the energy transferred by them is incommensurable with the energy required for geodynamics. The formation of fluids in crustal rocks during activation is analyzed. More details of other phenomena studied the formation of hydrogen fluid and its role in the creation of hydrocarbon deposits. The total number of crustal fluids can be matched to that fixed during degassing of the Earth. The participation of fluids from the upper mantle is beyond doubt, they arise in the process of activation of the tectonosphere, heat and mass transfer accompanied by partial melting of rocks. But their number is insignificant in comparison with the crustal fluids. The idea of the absence of conditions for the formation of fluids suitable for removal to the upper mantle and crust, in the lower mantle and core, is substantiated. Velocity sections are presented, which are given in support of this removal. As the regions for this control, transitional zones between continents and the Pacific Ocean are selected, where velocity disturbances can be maximum. Unreliability of the anomalies in the velocity of seismic waves in the lower mantle according to seismic tomography is shown.

**Key words:** degassing, formation and transfer of fluids, crust, mantle and core of the Earth.

## References

- Azbel, I., & Tolstikhin I. (1988). *Early evolution of the Earth*. Preprint. Apatity: Kola Branch of the USSR Academy of Sciences, 42 p. (in Russian).
- Aleksandrov, A. L., Gordienko, V. V., Derevskaya, E. I., Zemskov, G. A., Ivanov, A. P., Pano, B. S., Shumlyansky, V. A., & Epov, O. G. (1996). *Deep structure, evolution of fluid-magmatic systems and prospects of endogenous gold content of the southeastern part of the Ukrainian Donbass*. Kiev: Publ. of the Institute for Basic Research, 74 p. (in Russian).
- Babinets, A. E., & Vetshteyn, V. E. (1967). The results of studying the content of  $O^{18}$  in some genetic varieties of natural waters. In Problems of hydrogeology and engineering soil science (pp. 11—21). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Bazylev, B. A. (2000). The development of the avaraitite-containing mineral association in peridotites from fault zone  $15^{\circ} 20'$  (Atlantic Ocean) as one of the manifestations of oceanic metamorphism. *GeoScience*, 2 (3). <http://eos.wdcb.ru/journals/rjes/rus/v02/rje00045/rje00045.htm> (in Russian).
- Belov, S. V. (2003). The pure fuel of the future is hydrogen. *Prirodno-resursnyye vedomosti*, (47), 8 (in Russian).

- Belov, S.I., Boriskov, G.V., Bykov, A.I., Ilkayev, R.I., Lukyanov, N.B., Matveev, A.Ya., Mikhailova, O.L., Selemir, V.D., Simakov, G.V., Trunin, R.F., Trusov, I.P., Urlin, V.D., Fortov, V.E., & Shuykin, A.N. (2002). Shock-wave compression of solid deuterium. *Letters to Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 76 (7), 508—510 (in Russian).
- Belyavsky, V.V., & Aleksanova, E.D. (2014). Three-dimensional geoelectric model of the southern part of the Kamchatka Peninsula. *Fizika Zemli*, (1), 11—32 (in Russian).
- Voitov, G.I. (1974). Prior to the inception of the gas exchange on the shields (on the application of the Ukrainian Shield). *Geologicheskij zhurnal*, (2), 68—82 (in Ukrainian).
- Voytov, G.I., & Rudakov, V.P. (2000). Hydrogen atmosphere of subsoil deposits, its monitoring and application capabilities. *Fizika Zemli*, (6), 83—91 (in Russian).
- Galperin, A.M., Zaytsev, V.S., Kharitonenko, G.M., & Norvatov, Yu.A. (2009). *Geology: Pt. 3. Hydrogeology*. Moscow: Gornaya kniga, 400 p. (in Russian).
- Sugrobov, V.M. (Ed.). (1986). *Geothermal and geochemical studies of high-temperature hydrotherms*. Moscow: Nauka, 209 p. (in Russian).
- Gontovaya, L.I., & Gordienko, V.V. (2006). Deep processes and geophysical model of the mantle of East Kamchatka and Kronotsky Bay. *Geologiya i poleznyye iskopayemye Mirovogo okeana*, (2), 107—121 (in Russian).
- Gordienko, V.V. (2017). Thermal processes, geodynamics, deposits. [https://docs.wixstatic.com/ugd/6d9890\\_090e4a0466b94934b7d7af8c751a70bf.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/6d9890_090e4a0466b94934b7d7af8c751a70bf.pdf) (in Russian).
- Gordienko, V.V. (2018). On the motion of lithospheric plates in the oceans and transition zones. *Geofizicheskij zhurnal*, 40 (3), 149—166. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i3.2018.137181> (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., Kovachikova, S., Logvinov, I.M., Tarasov, V.N., & Usenko, O.V. (2005). *Ukrainian Shield (geophysics, deep processes)*. Kiev: Korvin press, 210 p. (in Russian).
- Gordienko, V.V., & Gordienko, L.Ya. (2018). Velocity model of the Ukrainian subcrustal mantle. *Geofizicheskij zhurnal*, 40 (6), 30—51. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151004> (in Russian).
- Gordienko, V.V., & Gordienko, L.Ya. (2017). Velocity models of the upper mantle of continental and oceanic rifts. *Geofizicheskij zhurnal*, 39 (6), 20—40. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i6.2017.116365> (in Russian).
- Dmitrievsky, A.N., & Valyaev, B.M. (Eds.). (2002). *Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil and gas*. Moscow: GEOS, 471 p. (in Russian).
- Dmitrievsky, A.N., & Valyaev, B.M. (Eds.). (2010). *Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil and gas. Hydrocarbons and life*. Moscow: GEOS, 712 p. (in Russian).
- Dmitriev, L.V., Bazylev, B.A., Borisov, M.V., Bugo, A., Silsntyev, S.F., & Sokolov, S.Ju. (1999). Formation of hydrogen and methane during serpentinization of mantle hyperbasites of the ocean and the origin of oil. *GeoScience*, 1 (6), 511—519 (in Russian).
- Druzyak, N.G. (2013). Does the ozone layer protect us? [http://www.telenir.net/alternativnaja\\_medicina/kak\\_prodlit\\_bystrotechnuyu\\_zhizn/index.php](http://www.telenir.net/alternativnaja_medicina/kak_prodlit_bystrotechnuyu_zhizn/index.php) (in Russian).
- Zhao, D., Piraino, F., & Liu, L. (2010). Structure and Dynamics of the Mantle under Eastern Russia and Adjacent Regions. *Geologiya i geofizika*, (9), 1188—1203 (in Russian).
- Zavaritskiy, A.N. (1961). *The igneous rocks*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 480 p. (in Russian).
- Zedgenizov, D.A., Shatsky, V.S., Panin, A.V., Evtushenko, O.V., Ragozin, A.L., & Kagi, H. (2015). Evidence of phase transitions of mineral inclusions in super-deep diamonds from the Sao Luis deposit (Brazil). *Geologiya i geofizika*, 56 (1-2), 384—396 (in Russian).
- Ivanov, A.V. (2010). Deep-seated geodynamics: process boundaries on the basis of geochemical and petrological data. *Geodinamika i tektonofizika*, (1), 87—102 (in Russian).
- Kissin, I.G. (2001). Fluid system and geophysi-

- cal heterogeneities of the consolidated earth's of the continents. *Vestnik otdeleniya geologii, geofiziki, geokhimii i gornyx nauk RAS*, (2), 1—22 (in Russian).
- Kovalenko, V.I., Naumov, V.B., Girnis, A.V., Dorofeeva, V.L., & Yarmolyuk, V.V. (2006). Evaluation of the average contents of H<sub>2</sub>O, Cl, F, S in depleted mantle based on the compositions of melt inclusions and quenching glasses of mid-oceanic ridges. *Geokhimiya*, (3), 243—266 (in Russian).
- Kozlovskiy, E.A. (Ed.). (1984). Kola superdeep. Investigation of the deep structure of the continental crust using drilling of the Kola superdeep well. Moscow: Nedra, 490 p. (in Russian).
- Krajushkin, V.A. (2008). The non-biogenic oil and gas content of modern centers of spreading the bottom of the World Ocean. *Geologiya i poleznyye iskopayemye Mirovogo okeana*, (3), 19—39 (in Russian).
- Litasov, K.D., & Shatskiy, A.F. (2016). Modern ideas about the composition of the Earth's core. *Geologiya i geofizika*, 57(1), 31—62 (in Russian).
- Lomize, M.G. (1999). The volcanic ring of the Pacific: its past, present and future. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, (9), 59—66 (in Russian).
- Lukin, A.E. (1997). *Lithological-dynamic factors of oil and gas accumulation in aulacogenic basins*. Kiev: Naukova Dumka, 224 p. (in Russian).
- Lukin, A.E. (2009). Native metallic micro- and nano-inclusions in oil and gas basin formations — tracers of super-deep fluids. *Geofizicheskiy zhurnal*, 31(2), 61—92 (in Russian).
- Menard, G.U. (1966). *Geology of the bottom of the Pacific Ocean*. Moscow: Mir, 274 p. (in Russian).
- Murich, A.T., Reznikov, A.I., Abrazhevich, E.V., & Serdyukov, V.V. (1975). The results of deep drilling in the central part of Donbass. *Sovetskaya geologiya*, (8), 125—131 (in Russian).
- Naboko, S.I. (1967). Soviet volcanology. *Voprosy geografii Kamchatki*, (5), 12—17 (in Russian).
- Shestopalov, V.M. (Ed.). (2018). *Essays degassing the Earth*. Kiev: Itek servis, 632 p. (in Russian).
- Rakaev, A.I., Neradovenkiy, Yu.N., Chernousenko, E.V., & Morozova, T.A. (2009). Mineralogical and technological studies of poor serpentinite copper-nickel ores of the Pechenga ore field. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, (4), 632—637 (in Russian).
- Reteyum, A.Yu. (2018). Deep degassing of the Earth as a leading endogenous process: Proc. of the Int. Conf. "Degassing of the Earth: Geology and Ecology — 2018", April 24—26, 2018, Moscow. [http://oilgasjournal.ru/issue\\_23/reteyum.pdf](http://oilgasjournal.ru/issue_23/reteyum.pdf) (in Russian).
- Ritman, A. (1964). *Volcanoes and their activities*. Moscow: Mir, 438 p. (in Russian).
- Ryabchikov, I.D. (1985). Water solutions in the upper mantle and the problems of degassing the Earth. In *Underground waters and the evolution of the lithosphere* (Vol. 1, pp. 176—187). Moscow: Nauka (in Russian).
- Ryabchikov, I.D. (1982). Fluid mass transfer and mantle magma formation. *Vulkanologiya i seysmologiya*, (5), 3—9 (in Russian).
- Ryabchikov, I.D., & Kaminskiy, F.V. (2013). The composition of the lower mantle according to the data of mineral inclusions in diamonds. *Doklady RAN*, 453(5), 540—543 (in Russian).
- Savko, A.D., Nadezhka, L.I., & Shevyrev, L.T. (2008). New data on the fluid and seismic activity of the Voronezh anticline. In *Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil, gas and their parageneses* (pp. 439—441). Moscow: GEOS (in Russian).
- Solovova, I.P. (2004). *Mantle magmas and fluids from the study of inclusions in minerals*. Doctor's thesis. Moscow: IREM RAS, 335 p. (in Russian).
- Starostin, V.I., & Ignatov, P.A. (1996). *Geology of minerals*. Moscow: Moscow University Press, 477 p. (in Russian).

- Tolstikhin, I. N. (1991). Early evolution of the Earth: limitations resulting from the analysis of isotope geochronometric systems. *Fizika Zemli*, (8), 73—90 (in Russian).
- Tolstikhin, I. N., Marti, B., Poceli, D., & Gofman, A. (2012). Earth degassing: models based on xenology. Annotations of the reports of the 14<sup>th</sup> seminar of the IKI RAS. <http://www.iki.rssi.ru/galeev/past2012.htm> (in Russian).
- Semenenko, N. P. (Ed.). (1979). *Ultrabasic formations of the central part of the Ukrainian Shield*. Kiev: Naukova Dumka, 412 p. (in Russian).
- Fedorin, Ya. V. (1991). *Model of the evolution of the early Earth*. Kiev: Naukova Dumka, 112 p. (in Russian).
- Verhoogen, J. (1962). *Metamorphic reactions and metamorphic facies*. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 414 p. (in Russian).
- Shumlyanskiy, V. A. (1983). Cimmerian metallogenic epoch on the territory of Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 220 p. (in Russian).
- Shumlyanskiy, V. A. (2007). Tectonic conditions of the Cimmerian era of ore formation on the East European platform. In *Scientific works of the Institute of Basic Research* (pp. 50—68). Kiev: Logos (in Russian).
- Yurova, M. P. (2018). Degassing of volcanoes. *Actual problems of oil and gas: Proc. of the Int. Conf. "Degassing of the Earth: Geology and Ecology — 2018", April 24—26, 2018, Moscow* (is. 4). doi: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art 63 (in Russian).
- Anzellini, S., Dewaele, A., Mezouar, M., Loubeyre, P., & Morard, G. (2013). Melting of Iron at Earth's Inner Core Boundary Based on Fast X-ray Diffraction". *Science*, 340, 464—466. doi: 10.1126/science.1233514.
- Badro, J., Côté, A., & Brodholt, J. (2014). A seismologically consistent compositional model of Earth's core. *Proceedings of NAS USA*, 111 (21), 7542—7545. <https://doi.org/10.1073/pnas.1316708111>.
- Barriga, F., Costa, I., Relvas, J., Ribeiro, A., Fouquet, Y., Ondreas, H., & Parson, L. (1997). The Rainbow serpentinites and serpentinite-sulphide stockwork (Mid-Atlantic Ridge, AMAR segment): A preliminary report of the Flores results. *EOS*, 78 (46), F832.
- Clesi, V., Bouhifd, M., Bolfan-Casanova, N., Manthilake, G., Schiavi, F., Raepsaet, C., Bureau, H., Khodja, H., & Andrault, D. (2018). Low hydrogen contents in the cores of terrestrial planets. *Science Advances*, 4 (3), 1—6. doi: 10.1126/sciadv.1701876.
- Collerson, K., Hapugoda, S., Kamber, B., & Williams, Q. (2000). Rocks from the Mantle Transition Zone: Majorite-Bearing Xenoliths from Malaita, Southwest Pacific. *Science*, 288, 1215—1223. doi: 10.1126/science.288.5469.1215.
- Douglass, A., & Fioletov, V. (Eds.). (2011). *Stratospheric Ozone and Surface Ultraviolet Radiation. Scientific Assessment of Ozone Depletion*. WMO, 80 p.
- Giggenbach, W. (1997). The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems. In H. Barnes (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (pp. 737—796). New York: J. Wiley.
- Gilat, A., & Vol, A. (2012). Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geoscience Frontiers*, 3 (6), 911—921. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.009>.
- Gorbatov, A., Domínguez, J., Suarez, G., Kostoglodov, V., Zhao, D. & Gordeev, E. (1999). Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula. *Geophysical Journal International*, 137(2), 269—279. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.t01-1-00801.x>.
- Gordienko, L., & Gordienko, V. (2016). P-wave velocities in the upper mantle beneath oceans. *NCGT Journal*, (3), 389—405.
- Gu, Y., Dziewonrski, A., & Ekström, G. (2003). Simultaneous inversion for mantle velocity and topography of transition zone discontinuities. *Geophysical Journal International*, 154 (2), 559—583. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01967.x>.
- Iizuka-Oku, R., Yagi, T., Gotou, H., Okuchi, T.,

- Hattori, T., & Sano-Furukawa, A. (2017). Hydrogenation of iron in the early stage of Earth's evolution. *Nature Communications*, 8, 14096. <https://doi.org/10.1038/ncomms14096>.
- Harmand, M., Ravasio, A., Mazevet, S., Bouchet, J., Denoeud, A., Dorchies, F., Feng, Y., Fourment, C., Galtier, E., Gaudin, J., Guyot, F., Kodama, R., Koenig, M., Lee, H. J., Miyaniishi, K., Morard, G., Musella, R., Nagler, B., Nakatsutsumi, M., Ozaki, N., Recoules, V., Toleikis, S., Vinci, T., Zastrau, U., Zhu, D., & Benuzzi-Mounaix, A. (2014). Melting of iron close to Earth's inner core boundary conditions and beyond. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1411/1411.2074.pdf>.
- Menaker, G. (2011). *Theoretical models in geochemistry and ore genesis*. Chicago: Lulu Press, 271 p.
- Kukkonen, I. T. (Ed.). (2011). *Outokumpu Deep Drilling Project 2003—2010*. Geological Survey of Finland, Special Paper 51, 252 p.
- Ozone and UV-radiation*. (2009). Blindern: University of Oslo, 73 p. [https://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/nedlagte-emner/FYS3610/h09/undervisningsmateriale/compendium/Ozone\\_and\\_UV\\_2009.pdf](https://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/nedlagte-emner/FYS3610/h09/undervisningsmateriale/compendium/Ozone_and_UV_2009.pdf).
- Sakami, T., Ohtani, E., Fukui, H., Kamada, S., Takahashi, S., Sakairi, T., Takahata, A., Sakai, T., Tsutsui, S., Ishikawa, D., Shiraishi, R., Seto, Y., Tsuchiya, T., & Baron, A. (2016). Constraints on Earth's inner core composition inferred from measurements of the sound velocity of hcp-iron in extreme conditions. *Science Advances*, 2(2), e1500802. doi: 10.1126/sciadv.1500802.
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2011). *Volcanoes of the World*. University of California Press, 2011. 568 p.
- Terasaki, H., & Fischer, R. (Eds.). (2016). *Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core*. Hoboken: J. Wiley & Sons, 312 p.
- Welhan, J., & Grain, H. (1979). Methane and hydrogen in East Pacific rise hydrothermal fluids. *Geophysical Research Letters*, 6(11), 829—831. <https://doi.org/10.1029/GL006i011p00829>.
- Zhang, Y., Sekine, T., He, H., Yu, y., Liu, F., & Mingjian Zhang, M. (2016). Experimental constraints on light elements in the Earth's outer core. *Scientific Reports*, 6, Article: 22473. <https://doi.org/10.1038/srep22473>.