

О геологическом водороде

В.М. Шестопапов, 2020

Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических
полигонных исследований НАН Украины,

Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 12 ноября 2020 г.

Образование геологического (абиогенного) водорода в недрах связывают с двумя группами гипотез: формирование вторичного водорода в земной коре и верхней мантии в результате его выделения из воды и некоторых минералов; выход первичного водорода из ядра и нижней мантии, накопленного в недрах при аккреции планеты. В связи с отсутствием прямого доступа к значительным глубинам Земли доказать правомерность существования первичного водорода в глубоких недрах очень сложно. Единство процессов в геосферах косвенно подтверждается представлением о Земле как о единой открытой саморазвивающейся системе с выделением тепловой энергии во всех ее геосферах, включая ядро. В этой системе существует сквозьгеосферный теплоперенос, что хорошо согласуется с представлениями о плюмтектонике. Дополнительным подтверждением генерации тепловой энергии на больших глубинах могут быть эксперименты с геонейтроном и проявления дегазации трития из жерл некоторых вулканов и глубинных слоев вулканических озер. О периодическом мощном выходе глубинного водорода из недр свидетельствуют результаты исследований В.Л. Сывороткина, А. Джилата и А. Вола, А.Ю. Ретеюма и др. Согласно результатам исследований состояния и изменения минеральной среды, а также условий образования глубинных нефтегазовых и рудных месторождений, алмазов, решающим в их формировании было влияние восстанавливаемых флюидов. Находки самородных металлов, в том числе алюминия, во вмещающих породах прямо указывают на обстановку восстановленной существенно водородной среды в период их образования. Первые термодинамические расчеты подтвердили возможность влияния первичного водорода на оливин с последующим образованием воды и серпентина. Попытки определения общего водородного потенциала в нефтегазодобывающих бассейнах на примере углеводородных ресурсов Днепровско-Донецкой впадины свидетельствуют, с одной стороны, о значительном ресурсном потенциале водорода, а с другой — о большом резерве неразведанных запасов углеводородов, о целесообразности совместных поисковых работ на углеводороды и водород. В связи с отсутствием полного доказательства гипотезы о первичном водороде и вследствие неопределенности особенностей его возможной дегазации поиски месторождений водорода следует проводить в зонах разломов, которые могут обеспечивать восходящее транспортирование значительных объемов водорода в соответствии с любой группой упомянутых выше гипотез. Это должны быть мощные глубинные разломы, к которым тяготеют соответствующие резервуары для промежуточного накопления водорода, перекрываемые слабопроницаемыми пластами, способными замедлить восходящую дегазацию водорода.

Ключевые слова: геологический вторичный и первичный водород, тепловой поток, геореактор, дегазация трития, глубинные разломы, самородные металлы, месторождения водорода.

... построить последовательную модель эволюции Земли невозможно, не включая в рассмотрение нижнюю мантию, внешнее и внутреннее ядро и пограничные участки между ними.

О.В. Арясова, Я.М. Хазан [2018].

Введение. В последнее время интерес к водороду вообще и, в частности, к водороду, находящемуся в недрах и имеющему абиогенное, т. е. чисто геологическое начало, существенно возрос. Хотя в бывшем СССР изучением геологического водорода

да в различных структурах, на различных глубинах и различного генезиса занимались в течение длительного времени, что впервые в обобщенном виде отражено в англоязычной публикации [Zgonnik, 2020], наиболее тщательные исследования водорода в недрах Земли отдельных регионов и конкретных генетических типов характерны для последних десятилетий. Особо следует выделить публикации, посвященные распространению водорода, возникшего в результате радиолиза воды [Vovk, 1987; Deyg et al., 1990; Lin et al., 2005; Sherwood Lollar et al., 2014; Warr et al., 2019 и др.], гидролиза минералов [Молчанов, 1981; Sherwood Lollar et al., 2014; Warr et al., 2019 и др.], биологическому происхождению и поглощению водорода [Takai et al., 2004; Lin et al., 2005; Russel et al., 2010; McCollom, Seewald, 2013; Суханова и др., 2013; Wang et al., 2014; Konn et al., 2015; Чакмазян, 2016 и др.], миграции и образованию водорода в разломных зонах [Wakita et al., 1980; Sugi-saki et al., 1980; Jones, Pirkle, 1981; Ware et al., 1984; Sato et al., 1986; Su et al., 1992; Zhou et al., 2010 и др.]. Огромное количество публикаций посвящено различным аспектам возникновения водорода в результате взаимодействия воды с минералами основных и ультраосновных пород и, в частности, с широко распространенным минералом оливином, а также вследствие переработки пород верхней мантии и коры магматическими процессами [Sleep et al., 2004; McCollom, Bach, 2009; Russel et al., 2010; Портнов, 2010; Белов, 2011; Šrámek, 2013; McCollom, Seewald, 2013; Wang et al., 2014; Holm et al., 2015; Konn et al., 2015; Worman et al., 2016; Huang et al., 2017; Malvoisin et al., 2017; Klein et al., 2019 и др.]. Все перечисленные и некоторые другие процессы приводят к образованию вторичного водорода.

Однако разрабатываются гипотезы и предпринимаются попытки изучения первичного водорода, сконцентрированного по этим представлениям в ядре и нижней мантии Земли в период ее аккреции и дегазирующего из недр с пульсирующей во времени различной активностью на протяжении всего периода ее существования.

Если первая группа гипотез и их аспектов наиболее широко разрабатывается специалистами дальнего зарубежья, то гипотезы глубинного водорода в основном зародились и развиваются прежде всего в кругах советских и постсоветских ученых. Начиная с В.И. Вернадского (развившего соответствующие взгляды Дж. Геттона, А. Гумбольта, Э. Зюсса, В.А. Обручева и др.), при весомых вкладах Д.С. Коржинского, В.И. Смирнова, А.Д. Щеглова и других по участию мантийных флюидов в эндогенном рудообразовании, к представлениям о ключевой роли водорода в дегазации и развитии Земли, разработанных В.Н. Лариным [1993, 2005], Н.П. Семененко [1990], А.А. Маракушевым [1999], развиваемых ныне В.Н. Румянцевым [Rumyantsev, 2016], В.А. Кривицким [2016], А.Ю. Склярным [2012] и другими. Эти представления подтверждаются конкретными исследованиями Ф.А. Летникова [2001, 2015 и др.], И.Л. Гуфельда [2012, 2013 и др.], А.Е. Лукина [2000, 2009, 2015, 2018 и др.], В.Л. Сывороткина [2002, 2018 и др.], С.В. Белова [2011 и др.], А.И. Тимурзиева [2013 и др.] и многих других. Следует отметить, что и среди исследователей дальнего зарубежья имеются «сторонники» глубинного водорода. Это, в частности, [Kronig et al., 1946; Stevenson, 1977; Poirier, 1994; Walshe, 2006; Gilat, Vol, 2005, 2012; Murphy, 2016; Ikuta et al., 2019 и др.]. Проводятся также исследования, подтверждающие устойчивость соединений водорода и железа при больших давлениях, характерных для ядра Земли [Isaev et al., 2007; Zhang et al., 2018].

Безусловно, доказательство этих гипотез и получение прямого или косвенного эмпирического материала, подтверждающего их правоту, в связи с отсутствием прямого доступа к глубинным недрам планеты связано с гораздо большими трудностями, чем при изучении вторичного водорода. Поэтому большинство публикаций, посвященных геологическому водороду, сосредоточено на исследовании его проявлений в верхней части земной коры и в той или иной мере посвящены его вторичному образованию. Поскольку

выявление существования первичного водорода является исключительно сложной, но, в случае полного подтверждения, весьма важной в научном и прикладном значении задачей, рассмотрим некоторые новейшие результаты исследований, которые вступают в противоречие с уже известными гипотезами и ограничениями, не способствующими развитию новых зарождающихся представлений о дегазации водорода из недр.

Тепловыделение как показатель единой открытой саморазвивающейся системы планеты Земля. В качестве характерного примера отрыва процессов в коре и верхней мантии от других геосфер приведем разработанную В.В. Гордиенко адвективно-полиморфную гипотезу (АПП), широко используемую в различных построениях. В его монографии «Тепловые процессы, геодинамика, месторождения» (2017) на с. 33 читаем: *«по мнению автора, имеющейся в настоящее время информации вполне достаточно для решения задачи количественного описания параметров такого объекта и демонстрации соответствия выделяемой энергии всем известным энергоемким явлениям в течение всей геологической истории. Речь идет о радиогенной теплогенерации в коре и верхней мантии Земли, используемой в этом качестве в АПП. В рамках других существующих гипотез задача не решается»* (подчеркнуто автором настоящей статьи). К началу разработки этой гипотезы (1970-е годы) такое утверждение в качестве начального подхода к предварительной постановке задачи, возможно, было приемлемым. Однако в течение последующих лет не только постепенно нарабатываются данные по общему тепловыделению Земли, но и делаются попытки оценки значений автономного тепловыделения из ядра и нижней мантии, а также определения других источников генерации тепла, кроме радиогенного в коре и верхней мантии. Уточняющиеся результаты корреспондируются с разрабатываемыми в последнее время представлениями о Земле как об открытой саморазвивающейся системе, в которой отдельные гео-

сферы являются взаимосвязанными и взаимовлияющими подсистемами. В своей последней публикации В.Е. Хаин [2010] писал: «Наша планета представляет собой открытую, неравновесную, самоорганизующуюся, сложную систему, подсистемами которой являются многочисленные оболочки — геосферы». Внутренняя активность геосфер «не только автономна, но и взаимозависима от активности смежных геосфер и от планеты в целом, а также от окружающего космоса, что относится прежде всего к сквозному тепломассопереносу вещества в масштабах всей планеты» (подчеркнуто автором настоящей статьи) (с. 754). *Выводы, полученные также О.В. Арясовой и Я.М. Хазаном, опубликованные в «Геофизическом журнале» в 2018 г. и приведенные в виде эпиграфа к нашей статье, как нельзя лучше отражают эту мысль: «построить последовательную модель эволюции Земли невозможно, не включая в рассмотрение нижнюю мантию, внешнее и внутреннее ядро и пограничные участки между ними»* (с. 86).

Большинство современных оценок глобального теплового потока из недр Земли дают значения 44—47 ТВт [Pollak et al., 1993; Jaupart et al., 2007; Davies, Davies, 2009]. Общий тепловой поток из ядра Земли согласно расчетам по различным моделям оценивается в 5—17 ТВт [Hernlund et al., 2005; Lay et al., 2006; Jaupart et al., 2007; Anderson, 2009; Mareshal et al., 2012]. В работе [Leng, Zhong, 2008] по результатам анализа мантийных плюмов дается оценка теплового потока из ядра 11 ТВт. В работах [Pozzo et al., 2012; De Koker et al., 2012] кондуктивный поток тепла из ядра составляет соответственно 15—16 и 14—20 ТВт. Тепловой поток из континентальной земной коры оценен в 6,8 ТВт [Huang et al., 2017], океаническая кора по данным [White, 2013] выделяет 0,13 ТВт тепла, всего по коре — около 7 ТВт. В работе [Dye, 2012] приведено значение теплогенерации в земной коре 8,1 ТВт, что весьма похоже на приведенное выше определение. Авторы работы [Арясова, Хазан, 2018] на основе анализа нескольких оценок предполагают, «что суммарная мощность, поступающая в мантию из ядра

и генерируемая внутри мантии, составляет около 39 ТВт» (с. 84). В работе [Šrámek et al., 2013] собраны современные оценки радиогенного тепла в зависимости от принятых типов моделей. Так, в рамках космохимических моделей (за основу берутся энстатитовые хондриты) общее радиогенное тепловыделение составляет 9—13 ТВт, в геохимической группе моделей (учитываются углистые хондриты) — 16—24 ТВт. Геодинамические модели, базирующиеся на традиционной конвекции, оценивают общее радиогенное тепло в 30—36 ТВт. По данным исследования [Баранов, 2010] для поддержания магнитного поля Земли необходимый расход энергии внутри ядра составляет около 85 ТВт.

Основной вклад в радиогенное тепловыделение Земли в настоящее время определяется распадом долгоживущих изотопов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , который сопровождается выделением энергии и рождением антинейтрино (геонейтрино) в количестве соответственно 6, 4, 1 на каждый акт деления указанных изотопов [Сергеев, 2015]. Интересными являются первые опыты изучения радиогенного тепловыделения с помощью экспериментов с геонейтрино [Araki et al., 2005; Gando et al., 2011 и др.], которые допускают возможность существования природного реактора в глубоких недрах Земли. В этой связи отметим, что такая возможность обсуждается в течение многих десятилетий [Kuroda, 1956; Herndon, 1993, 2003, 2009 и др.]. В настоящее время исследования выполняются с учетом результатов изучения реального природного ядерного реактора в Окло, действовавшего 1,8 млрд лет тому назад в крупном урановом месторождении (Западная Африка, Габон) [Cowan, 1976] и обнаруженного в 1972 г., а также около двух десятков реакторных зон, выявленных позднее в этом же районе [Meshik et al., 2004; Петров и др., 2005]. Согласно выводам [Herndon, 2009], в глубине внутреннего ядра Земли может находиться природный ядерный реактор (геореактор), состоящий из активной зоны и оболочки из продуктов деления и радиоактивного распада. Изменяющееся

во времени соотношение активной зоны и оболочки приводит к саморегуляции мощности работы реактора и пульсирующему режиму его функционирования. В работе [Hollenbach, Herndon, 2001] приведены результаты математического моделирования работы такого реактора. Разрабатываются и другие гипотезы возможности существования геореактора на границе мантии и ядра [Безбородов и др., 2008; De Meijen et al., 2004 и др.]. В настоящее время существующие в мире детекторы KamLAND (Япония) и Borexino (Италия) дают возможность уже сейчас получить некоторую информацию о распределении радиационного тепла на небольших глубинах и о возможном геореакторном тепловыделении в глубоких недрах [Bellini et al., 2013 и др.]. Результаты наблюдений на детекторе KamLAND свидетельствуют в пользу выработки радиогенного тепла согласно геохимическим моделям с учетом углистых хондритов (см. выше 16—24 ТВт) и не подтверждают данные геодинамических моделей. К данным этого детектора имелось большее доверие в связи с более значительной длительностью наблюдений, чем на детекторе Borexino, а также вследствие остановки всех АЭС в Японии после аварии на АЭС в Фукусиме в 2011 г., что уменьшило реакторный фон и соответственно улучшило качество полученных данных. В случае нахождения реактора в центре ядра ограничения сверху на его мощность составляют по KamLAND — 3,7 ТВт [Gando et al., 2013]. Согласно последней публикации по Borexino [Agostini et al., 2020], в случае расположения геореактора в центре ядра его максимальная мощность не должна превышать 2,4 ТВт, а при его расположении на границе ядро—мантия в зависимости от конкретного местоположения ограничения мощности сверху находятся в диапазоне 0,5—5,7 ТВт.

Наряду с учетом возможной работы геореактора, функционирующего благодаря делению радиоактивных элементов, рассматриваются возможности существования холодного ядерного синтеза в недрах Земли [Киркинский, Новиков, 2000; Jones, Ells-

worth, 2003; Терез, Терез, 2015 и др.] и других внутренних процессов, связанных с галактическим энергетическим воздействием на Землю [Макаренко, 2014; Rampino, 2015 и др.].

Интересное исследование выполнено коллективом [Rusov et al., 2007]. Для подтверждения возможности работы геореактора на границе внутреннего и внешнего ядра с заданной мощностью 30 ТВт, базирующегося на нейтронно-индуцированном делении ^{239}Pu с образованием и последующим бета-распадом трития и соответствующим накоплением ^3He , были выполнены приближенные оценки $^3\text{He}/^4\text{He}$ для разных геосфер. Они показали хорошую сходимость с имеющимися экспериментальными данными. Их представление через R и $R_a = 1,36 \cdot 10^{-6}$ в атмосфере дало следующие результаты. Расчетное R для коры 7,55 R_a , для верхней мантии 9,05 R_a , для низов нижней мантии (30—50) R_a , для слоя реакции в ядре (220—1160) R_a . Согласно экспериментальным данным [Anderson, 2000], эти значения для коры составляют $(7,91 \pm 1,5) R_a$, для верхней мантии — $(9,14 \pm 3,59) R_a$, для плюмов нижней мантии — $(11—15) R_a$, т. е. для верхних геосфер весьма близки к расчетным.

Важным подтверждением цепных ядерных реакций служат выходы продуктов деления. В частности, таким продуктом деления является тритий. Благодаря публикациям [Quick et al., 1991; Jones, Ellsworth, 2003] стало известно, что в эманациях вулканов Килауэа на Гавайях и Алседо на Галапагосском архипелаге (т. е. в горячих точках) обнаружены заметные концентрации трития до 15,4 тритиевых единиц — ТЕ (1 ТЕ — 3,2 пКи/кг H_2O). Авторы этих работ доказывают, что полученные данные не могут быть объяснены присутствием бомбового или космогенного трития, поступающего с метеорными водами с земной поверхности. Следы трития (от 0,08 до 0,73 ТЕ) обнаружены также в некоторых вулканах Азии, Америки и Новой Зеландии. Не менее важными являются и результаты анализа последовательно по глубине отобранных проб в некоторых глубоких вулканических озерах [Jiang et

al., 2007, 2010; Jiang, He, 2012]. Обычно в озерах с отсутствием вертикального перемешивания воды концентрация трития с глубиной быстро уменьшается. В озерах с перемешиванием воды эти концентрации не изменяются с глубиной. В обследованных же озерах, расположенных в жерлах потухших вулканов (Лаахер в Германии, Немрут в Турции), наблюдалось увеличение концентрации трития с глубиной, причем коррелирующее с увеличением концентрации ^3He . Как известно, распад трития приводит к образованию ^3He . *Полученные фактические данные свидетельствуют о необходимости тщательной проверки и возможной коррекции устоявшихся представлений о «первичности» всего ^3He в недрах Земли.*

К этой же группе доводов в пользу наличия цепных реакций относится установленное в алмазах изменение соотношения изотопов азота [Мервозеждинов и др., 2005]. Нормальное отношение $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ составляет $3,7 \cdot 10^{-3}$. В алмазах оно достигает $5 \cdot 10^{-3}$. Такое изменение могло быть вызвано облучением нейтронами изотопа ^{14}N . Представленные в упомянутой работе результаты проверки уровня потока нейтронов, обеспечившего переход ^{14}N в ^{15}N , свидетельствуют, по мнению авторов, о гораздо более мощном источнике нейтронов, чем естественные ядерные реакции.

Как подчеркивается в публикации [Безбородов и др., 2008], «работа геореактора подтверждает объяснение феномена [Шуколюков, 1997] аномального ксенона Земли (превышения отношения количества младших изотопов ксенона к ^{136}Xe от обычного отношения) как продукта нейтронно-индуцированного деления ^{235}U не только в минералах земной коры в прошлом, но и в породах, происходящих из глубинных слоев Земли — из мантии».

Таким образом, несмотря на расхождение в имеющихся оценках тепловыделения в различных геосферах, четко установлено, что доля тепловыделения в земной коре не является преобладающей. Значения тепловыделения в ядре Земли по имеющимся оценкам значительны и, по-

видимому, далеко не полностью выявлены. Автор настоящей статьи сознательно не пытается сводить баланс теплогенерации Земли, полученный для отдельных геосфер разными методами, хорошо понимая, что все значения тепловыделения приблизительно и неминуемо будут изменяться даже при использовании одного и того же метода исследований. Например, значения радиационной теплогенерации в Земле, полученные детектором Vogexino за 2056 дней наблюдений, составили 33_{-20}^{+28} ТВт [Agostini et al., 2015], а наблюдения на том же детекторе в течение 3262,7 дней — $38,2_{-12,7}^{+13,6}$ ТВт [Agostini et al., 2020]. С учетом приведенных данных можно предвидеть дальнейшее увеличение значений радиационной теплогенерации по мере увеличения длительности наблюдений на этом детекторе. А это приведет к необходимости пересмотра общего тепловыделения планеты в сторону увеличения даже с сохранением принятых подходов (см. выше) их оценки.

Следует также иметь в виду, что накапливающиеся данные все больше подтверждают правильность идеи известного астрофизика Ф. Хойла о существовании мощного магнитного поля у небулы, которое в период отделения протопланетного диска от протосолнца предопределило функционирование зависимости дифференциации вещества протопланет от потенциала ионизации химических элементов и расстояния до Солнца [Larin, 1993; Ларин, 2005; Toulhoat et al., 2015]. Эти данные приводят к целесообразности разработки и применению новой модели оценки мощности тепловыделения с учетом также более надежно оцененных процессов деления, ядерного синтеза и т. п. Согласно этой идеи, впервые эмпирически подтвержденной В.Н. Лариным, в Земле содержится гораздо больше урана, тория и калия, чем в метеоритах пояса астероидов, обычно используемых для оценок содержания этих элементов в нашей планете. Первой известной попыткой оценить суммарное тепловыделение Земли на основе гидридной модели является работа [Безруков и др., 2018]. Если следовать основным положениям

гидридной модели, то ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K содержатся во всех геосферах Земли, но не в одинаковых концентрациях, что не учитывалось в расчетах в упомянутой работе (в качестве первого приближения принято одинаковое распределение этих элементов по всему сечению). Полученная в этой работе суммарная оценка тепловыделения Земли составила 304 ТВт (оценка сверху) и является, по-видимому, завышенной даже для гидридной модели, прогнозирующей значительный конвективный отток тепла из недр. Следует при этом отметить, что в указанных расчетах не учитывались ядерные процессы деления или синтеза, вносящие свой вклад в теплогенерацию. Таким образом, в будущем в любом случае можно ожидать уточнения энергетики Земли в сторону увеличения с преобладающими ее составляющими в мантии и ядре.

Безусловно, выработка тепла неграми и возможные его источники будут в процессе дальнейшего изучения уточняться и, возможно, существенно. Но очевидно, что не нулевое выделение энергии в нижней мантии и ядре Земли должно предопределять влияние этих геосфер на процессы теплопереноса в верхней мантии и земной коре. А пока еще ограниченный опыт оценки дегазации трития и выявления других изотопов на глубинах алмазообразования уже свидетельствует о прохождении активных ядерных процессов в мантии и о возможности интенсивной восходящей дегазации оттуда, причиной которых может быть соответствующая активность как в мантии, так и в ядре.

Некоторые признаки глубинной дегазации водорода. Несоответствие между оценками энергии глубинных сфер Земли, радиогенной энергии коры и верхней мантии и общими оценками тепловыделения может быть хотя бы частично разрешено с учетом конвективного переноса энергии газовыми (преимущественно водородными, гелиевыми, метановыми) флюидами по относительно узким зонам. В этом случае гипотезы, признающие насыщение ядра водородом, в том числе гидридным, нуждаются в более серьезном внимании (имеются

в виду прежде всего гипотезы В.Н. Ларина, Н.П. Семененко, А.А. Маракушева, А. Джилата и А. Вола, В.Н. Румянцева, В.А. Кривицкого, J.I. Walshe и др.). Ссылки на несоответствие представлений этих гипотез существующим геотермометрам не корректны потому, что геотермометры расположены вне узких зон преимущественно флюидного выноса и термохимического усиления потоков тепловой энергии.

Вряд ли можно признать соответствующими истине публикации, не обнаруживающие следов массопереноса в земную кору [Родкин, Пуканова, 2015] и в верхнюю мантию снизу [Иванов, 2010]. В этой связи можем обратиться к нашей монографии «Очерки дегазации Земли» (с. 44—48, 96—109, 173—180 и др.) и к многочисленным публикациям А.Е. Лукина [2000, 2006, 2009; Старостенко и др., 2011 и др.], в том числе опубликованным в «Геофизическом журнале», в которых четко показано, что в углеводородсодержащих породах и, в частности, в пригужинитах Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ) на глубинах свыше 4—5 км обнаружены проявления РЗЭ (La, Pr, Pm, Eu, Nd, Tu, Eu) и соотношения $^{87}\text{Sr}/^{80}\text{Sr}$, характерные для глубинных (мантийных) алмазоносных лампроитов из трубок взрыва Западной Австралии. Для темноцветного пелитоморфно-полиминерального вещества, обнаруживаемого в трещинах гидроразрыва и зонах дробления прочных пород осадочного чехла на значительных глубинах в различных нефтегазовых бассейнах (НГБ), характерны геохимически несовместимые ассоциации аномального содержания хрома, никеля, платиноидов, РЗЭ, ртути, бора, бария и др. Все это, а также изотопные метки $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{32}\text{S}$, изотопный состав свинца, стронция свидетельствуют о глубинном, как минимум подкоровом источнике вещества. В этой же монографии (с. 228—238) на примере месторождения Белый Тигр на шельфе Вьетнама убедительно показано значительное распространение в высоких концентрациях самородных металлов, в ассоциациях которых обнаруживаются одновременно сидеро-

фильные (Fe, Cr, Ni, Ti), халькофильные (Cu, Zn, Pb, Ag, Cd и др.) и литофильные (РЗЭ, W, Al и др.) элементы. Все это свидетельствует о чрезвычайно сложном внедрении сверхглубинных флюидов, мобилизуемых на своем восходящем, нередко взрывном, продвижении различные минеральные комплексы, образуя исключительно сложный их микс. Геофизическое обоснование таких процессов убедительно показано в работе [Старостенко и др., 2011]. Что касается работы А.В. Иванова, то он делает очень осторожные заключения об ограниченности таких связей. При этом в работе показано, как кардинально изменялись выводы на разных этапах исследования и у разных авторов. По-видимому, уже выполненные исследования нуждаются в дополнительном детальном анализе и продолжении. Следует при этом учитывать результаты и иных исследований, в частности [Valyaev, Dremin, 2013 и др.], а также, например, выводы, полученные в работе [Арясова, Хазан, 2013] и формулируемые на основе фактических данных следующим образом: «... предпочтительная модель происхождения кимберлитов предполагает, что кимберлитовый магматизм возникает при воздействии на литосферу «головы» гигантского мантийного плюма» (с. 164). В публикации [Lay, 2015] подчеркивается, что в горячих точках аномальные тепловые процессы в слое D'' пронизывают всю мантию и достигают поверхности Земли, тем самым свидетельствуя о связи всех геосфер планеты.

Идея о значительном конвективном и термохимическом переносе энергии из глубоких недр Земли хорошо соотносится с плюмтектоникой, которая на современном этапе развития имеет самостоятельное большое значение [Добрецов, 1997; Кирдяшкин и др., 2008; Трубицин, Харыбин, 2010; Житнуев, 2012; Арясова, Хазан, 2013; Цветкова и др., 2017 и др.].

В 60 годах XX ст. по инициативе В.В. Белоусова реализовался международный проект «Проект верхней мантии». Для своего времени он был весьма плодотворным. Однако новые достижения, в частности

плюмтектоники, свидетельствуют о необходимости рассматривать значительную часть глубинных энергетических процессов с позиций единства геосфер Земли, являющихся взаимосвязанными компонентами единой открытой развивающейся системы. *Безусловно, получение на доказательной основе наиболее достоверных конкретных оценок соотношения энергий крупномасштабных сквозьгеосферных и корово-верхнемантийных процессов — задача актуальная, но игнорирование такой связи в принципе является уже очевидным недостатком, нарушающим логику современного развития геодинамики.*

Поскольку нас прежде всего интересует не массоперенос вообще, а перенос водорода из глубинных геосфер Земли, необходимо учитывать важные для этой проблемы выводы, полученные И.Л. Гуфельдом, Ф.А. Летниковым и другими исследователями. Имеется в виду диффузионная форма переноса водорода в мантии и значительные его скорости, существенно превосходящие скорости миграции всех других компонентов. Иными словами, нижняя мантия может служить эффективным фильтром, пропускающим водород и задерживающим в различной мере на разных глубинах значительную часть многих других компонентов. Тем не менее присутствие в комплексах самородных металлов никеля и его твердых растворов с железом и хромом, повышенные его концентрации в нефтях могут рассматриваться как признак участия в формировании нефтидов суперглубинных флюидов. Широкое применение методов исследования, основанных на выявлении наночастиц в нефтях и вмещающих породах, позволит еще более усилить позиции относительно реальности процессов массопереноса из суперглубин, что уже делается в исследованиях А.Е. Лукина, М.И. Новгородовой и других. Как известно, высокое содержание никеля в мантийных магмах рассматривается как подтверждение миграции этого вещества из земного ядра [Рябчиков, 2003], либо может свидетельствовать в пользу некоторых положений гипотезы В.Н. Ларина.

В связи с этим предположением особого внимания заслуживают результаты работ, касающиеся состава мантии. В публикации, посвященной исследованию популяции крупных алмазов [Smith et al., 2016], типичным примером которых является алмаз Кулинан массой 3106 карат, было убедительно показано, что они образовались в расплаве Fe-Ni-CS с примесями водорода, фосфора, хрома и других элементов, указывающих на восстановительную среду. Выявленные ограничения свидетельствуют о том, что такие алмазы могут образовываться в переходной зоне на глубинах 410—660 км. Судя по результатам исследований, опубликованных в работах [Rohrbach et al., 2007, 2011], на глубинах ниже 250 ± 30 км мантия не менее чем на 75 % насыщена металлами. Вследствие этого предполагается, что рост крупных алмазов в мантии на упомянутых глубинах может происходить в жидкой смеси металлов при высоком давлении. Поскольку аналогичные особенности зафиксированы в алмазах разного возраста (возраст алмаза Кулинан из кимберлита Premier в Южной Африке 1,18 млрд лет, а алмаза из кимберлита Letseng в Лесото 90 млн лет), высокое содержание металлов на указанных глубинах является стабильным во времени и широко распространенным. Приведенные результаты исследований могут свидетельствовать в пользу металлосферы В.Н. Ларина. По-видимому, наиболее вероятно существование переходной зоны с постепенным увеличением концентрации металлов и вытеснением оксифильных минералов с глубиной. Важно при этом отметить, что экспериментальное изучение крупных глубинных алмазов привело авторов работы [Smith et al., 2016] к выводу о том, что высокая растворимость водорода в жидком металле высокого давления подтверждается водородом во включениях Fe-Ni-CS алмазов, *что предполагает значимый вклад металлов мантии в водородный баланс значительных глубин Земли* (выделено автором настоящей статьи).

Следует также обратить внимание на некоторые важные положения, опублико-

ванные в работе [Gilat, Vol, 2012]. Этими авторами было обращено внимание на публикацию [Simkin et al., 1994], изданную Геологической службой США совместно с Смитсоновским институтом. В ней делается вывод о том, что прочность пород литосферы недостаточна для создания механических напряжений, обеспечивающих возникновение землетрясений с магнитудой 9 баллов. Тем не менее такие землетрясения — не редкость. А. Джилат и А. Вол выполнили численный эксперимент на примере землетрясения с магнитудой 9,2, произошедшего на Аляске в 1964 г. Был произведен расчет максимальной энергии для условий замены реальной прочности литосферы региональным блоком высококачественной стали. В результате получен выход энергии, в 15 раз меньший действительного выхода энергии этого землетрясения. Поскольку реальные предельно возможные напряжения в литосфере существенно уступают соответствующим параметрам стали, то это несоответствие между максимально возможной энергией, обеспечиваемой реальной литосферой, и энергией максимально возможных землетрясений еще более возрастает. В результате авторы приходят к резонному выводу о газозоврывной природе таких землетрясений. Реальность энергетической термохимически взрывной реакции флюидов при ряде землетрясений обосновывается и во многих других публикациях [Вадковский, 1996, 2012; Копничев, 1997; Zarifi, Havskov, 2003; Шевченко и др., 2011; Lindenfeld et al., 2012 и др.]. Эти и другие подобные результаты следует учитывать: либо доказательно давать им другую интерпретацию, либо соглашаться, а не просто игнорировать.

В его статье [Гордиенко, 2020] на основе общих оценок превышения содержания водорода в атмосфере по сравнению с геологической средой делается заключение о поглощении атмосферного водорода этой средой и разрушении им почвенного слоя. Критикуя многие оценки генерации водорода в геологической среде за недостоверность, автор этой статьи сам увлекается такими оценками без тщательного объектив-

ного анализа всех возможных путей его поступления и возможных изменений его дегазации во времени, связанных, в частности, с его аномальным выделением в периоды землетрясений. При всей очевидности возможного перехода водорода из атмосферы в почву (и обратно!), обратим внимание на необходимость решения этого вопроса лишь на основе тщательного анализа конкретных условий и процессов такого взаимодействия, а не в результате сопоставления ориентировочных глобальных оценок. Формулируя свою позицию о небольших количествах водорода в геологической среде, автор, в частности, базируется на построениях работы [Lin et al., 2005], в которой анализируются результаты анализа 24 проб воды, отобранных в скважинах пяти золоторудных и одной угольной шахте бассейна Витватерсранд в Южной Африке. Горные работы, естественно, привели к существенной деформации природной газовой-гидрогеологической обстановки, обусловленной неравномерным притоком метеорных вод и разубоживанием концентраций первичных газов, изменением геохимических условий, приведшим к активизации окислительных процессов и переводу восстановленных газов в окисленные соединения. В публикации отсутствуют анализ тектонических условий района и упоминания о возможном отборе пробы (или проб) в разломной зоне. Таким образом, здесь речь не шла о системном исследовании территории в отношении количественных проявлений водорода различного генезиса. Возможные геологические источники образования водорода определяются глубинами фактически вскрытого геологического разреза (в статье упоминается глубина 3300 м). Более глубокозалегающие источники его образования, кроме радиолита, по сути, не рассматриваются, хотя известно, что возможности его восходящей миграции по разломам могут быть значительными и глубинная компонента в его восходящей миграции весьма вероятна. Поэтому установленный в этой публикации разброс фактических концентраций водорода на 5 порядков в интервале глубин

около 2,5 км может быть не предельным и проинтерпретировать его, по-видимому, можно и по-другому. *Следует также иметь в виду, что не только упомянутая, но и большинство публикаций, посвященных геологическому водороду, не базируются на данных, получение которых предварительно было бы спланировано на изучение крупных раскрытых разломных зон, выявление в них представительных средних и максимальных оценок дегазации водорода и ориентированных на поиск его промышленных скоплений в соответствии с особенностями преимущественных путей его миграции. К необходимости постановки и выполнения таких исследований мы только подходим.* Кроме того, в публикации В. Згоника, на которую приведена ссылка в статье, рассматриваются не только геологический водород, но и атмосферный. Следовало бы обратить внимание на то, что приведенные в ней суммарные значения водорода, относящегося к упомянутым средам и источникам, сопоставимы. Действительно, по его данным геологического водорода производится 23 ± 8 Тг/год, атмосферного — 41 ± 11 Тг/год, биологического — $37 \pm 9,5$ Тг/год. Как видим, геологического водорода по этим данным производится меньше, чем остальных, но приведенные значения сопоставимы, отличаясь ориентировочно в 2 раза в пользу атмосферного, а не более чем на порядок, как выходит у авторов ряда работ. При этом В. Згонник резонно отмечает, что его оценки геологического водорода не полны и что за период с начала попыток таких оценок суммарные значения производства геологического водорода возрастали на порядок через каждые десять лет. Безусловно, определение потоков водорода является весьма сложной задачей. Все определения ориентировочны и будут неизбежно изменяться. Но важно именно ориентировочные, но более полные оценки не подменять категорическими утверждениями, а конкретно их анализировать.

Известно, что углеводородный потенциал любого НГБ определяется не только запасами известных месторождений, а и практически не затронутым изучением по-

тенциалом больших глубин (обычно более 5 км), неразведанными территориями на обычных глубинах, газом плотных пород, углеводородом кристаллического фундамента и т. д. Поскольку В. В. Гордиенко вместо уточнения возможного потенциала углеводородов бассейна в качестве основных доводов ссылается на знание общих аспектов проблемы нефтегазоносности НГБ, попытаемся выяснить сами, что он конкретно сделал, определяя возможный потенциал водорода в ДДВ по запасам в нем углеводородов [Гордиенко, 2020]. В его монографии «Тепловые процессы, геодинамика, месторождения» (2017) на с. 234 об углеводородном потенциале ДДВ написано следующее: *«Будем считать, что известные месторождения на ее детально изученной территории отражают «полную» нефтегазоносность (подчеркнуто автором настоящей статьи), т. е. количество углеводородов в еще не открытых месторождениях изменяется от места к месту примерно так же, как в уже открытых».* Далее, используя карту известных запасов углеводородов (в млн т.у.т.), автор выясняет наличие связи между распределением этих запасов (удельных запасов на единицу площади) и аномалиями гравитационного поля, электропроводности и теплового потока. Это же построение он использует в более поздней публикации [Гордиенко и др., 2020], судя по аналогичному прилагаемому рисунку. Но задачи, решаемые в монографии и в статье, подготовленной к публикации в 2020 г. и опубликованной [Гордиенко и др., 2020], были разные: для цели, поставленной в статье, важным было не местоположение скоплений углеводородов, как в монографии, а на основе общей ориентировочной оценки углеводородного потенциала ДДВ дать приближенную общую оценку водородной дегазации в этом НГБ. Поскольку автор избегает ответа на этот вопрос, я обратился к Александру Ефимовичу Лукину, который обладает наибольшими знаниями по этой проблеме. По его мнению, суммарные известные запасы углеводородов в ДДВ не превышают пятой части общего углеводородного потенциала. К этому следует доба-

вить и водород, не перешедший в углеводороды и фиксируемый во многих поисково-разведочных и эксплуатационных скважинах, а также расходуемый в процессе восходящей миграции. По-видимому, консервативная оценка водородного потенциала должна быть не менее чем на порядок больше задействованного объема водорода при формировании известных углеводородных месторождений. Следовательно, вывод о существенном занижении водородной дегазации, если исходить из потенциала лишь известных месторождений, и в этом случае вполне правомерен. Другое дело, что этот подход, даже с учетом упомянутой коренной коррекции А.Е. Лукина, немного нам дает для определения перспективности того же ДДВ в отношении поисков месторождений водорода. Ведь этот оцениваемый водород уже в значительной мере расходуется на формирование, поддержание и возможное современное увеличение запасов углеводородов в бассейне. Перспективными могут оказаться лишь те его части, которые в связи с отсутствием активного углерода и других причин остались не задействованными в образовании углеводородов. Но конкретное выявление перспективных скоплений водорода весьма затруднительно, поскольку местоположение значительной части месторождений углеводорода, как уже отмечалось, остается неизвестным, а месторождения водорода могут образовываться в основном за их пределами. *Из этого, в частности, следует, что задачи выявления месторождений углеводородов и водорода целесообразно решать как единую комплексную задачу.*

Обращают также внимание следующее противоречие, допускаемое В.В. Гордиенко. С одной стороны, он провозглашает, что основные пути миграции водорода в недрах связаны с разломами, что верно. С другой, игнорирует результаты, полученные В.Л. Сывороткиным в связи с общим преобладанием атмосферного водорода над геологическим. *А ведь простое сравнение соотношения концентраций водорода в атмосфере и циркулирующего в недрах (и выходящего из недр) является некор-*

ректным. Оно должно корректироваться с учетом того, что площадь выхода на поверхность основной трещинно-разломной пустотности, по которой мигрирует основная часть водорода в недрах и выходит на поверхность, на 2—3 порядка уступает общей поверхности контакта геологической среды с атмосферой. Простой учет таких поправочных коэффициентов предопределяет реалистичность струйного внедрения основного объекта водорода из недр в атмосферу. Более того, этот процесс усиливается многократно при землетрясениях. В частности, по данным Д.Г. Осики [1981], землетрясение в Дагестане с $M = 6,7$ в 1970 г. вызвало увеличение дегазации водорода в атмосферу на 5—6 порядков. Имеются и другие многочисленные наблюдения активизации выхода водорода при землетрясениях в различных регионах. Причем они особенно аномальны в раскрытых разломах и крупных трещинах.

Существуют разнообразные причинно-следственные связи между циклическими изменениями проницаемости разломно-трещинной системы и планетарными, региональными и местными геодинамическими процессами. Все они в той или иной степени способствуют разновременным циклическим изменениям интенсивности дегазации и периодически создают условия для ее аномальности. Не останавливаясь на планетарных и субпланетарных циклах, по которым имеется достаточно обширная литература, выделим локальную изменчивость, для выявления которой необходима постановка специальных мониторинговых работ. В частности, выполненный по Речицкому разлому в Припятской впадине многолетний геодезический мониторинг показал, что в условиях общего растяжения структуры наблюдается периодический подъем и опускание отдельных фрагментов разломной зоны [Кузьмин, 2012]. Такой процесс способствует формированию мигрирующих во времени и пространстве разломной зоны импульсов дегазации.

В этой связи остаются совершенно не обоснованными соображения об определя-

ющей роли атмосферного водорода в формировании, в частности, западин. Попутно отметим, что термин «западина» — не выдумка авторов монографии [Шестопалов и др., 2018], а общепринятый термин, в течение многих десятилетий применяемый в географии, геоморфологии и других дисциплинах. Чтобы убедиться в этом, достаточно заглянуть в интернет. Так вот, именно концентрированная дегазация водорода по разломам и оперяющим крупным трещинам в периоды геодинамической пульсационной аномальной активизации недр формирует подзападинные каналы и сами западины дегазационного типа. Такой вывод получен многими исследователями и прежде всего В.Н. и Н.В. Лариными. В дальнейшем на эти образования накладываются процессы перераспределения поверхностного стока в подземный, суффозии, карстообразования, дальнейшего изменения поровотрещинной проницаемости, физико-химические процессы выветривания и др. Такие западины на суше и на морском дне определяются однотипными процессами дегазации. Подтверждением таким процессам служат не только периодически возникающие и отслеживаемые в этих средах газовые факелы, взрывы, выбросы, возгорания, а также возникновение предваряющих участков пучения и растрескивания, но и многочисленные данные сейсмоки, полученные в условиях обеих сред. Они четко свидетельствуют о наличии под западинами каналов с повышенной проницаемостью среды, достигающих различных глубин в зависимости от нахождения латеральных источников концентрированных газов. В фоновом режиме подпитка водородом по этим каналам может поглощаться биотой и окислением в почвенном слое и ниже. В период активизации водород прорывается в атмосферу и может локально достигать там значительных концентраций.

Именно признание исключительной избирательности основных путей миграции водорода по разломно-трещинным путям и связанным с ними структурам разного ранга (от вулканов, эпицентров землетрясений до западин и подзападинных кана-

лов) и существенной пульсационности этого процесса во времени с различной амплитудой значений (условно от 2—5 раз до нескольких порядков) в верхней зоне геологической среды объединяет работы В.Л. Сывороткина, С.В. Белова, В.Н. и Н.В. Лариных, А.Е. Лукина, А. Джилата, А. Вола, В.А. Згонника, а также наши и многие другие, посвященные проявлениям дегазации. В частности, А. Джилат и А. Вол [2012] весьма четко выразили эту особенность дегазации, связанную именно с ее глубинными аномалиями. Думается также, что кажущиеся несоответствия между результатами многолетних исследований В.А. Нивина [Nivin, 2019 и др.] и выводами В.Л. Сывороткина по воздействию водорода на формирование озонового минимума над Кольским полуостровом является мнимыми. Во-первых, В.Л. Сывороткин показал на основе фактических измерений наличие корреляции между минимумом озонового слоя и относительным максимумом дегазации водорода по данным измерений в подпочвенном слое [Сывороткин, 2018]. Во-вторых, исследования В.А. Нивина, как и работа [Lin et al., 2005] определялись условиями и масштабами проведения горных работ конкретных месторождений. А озоновые эффекты, которые проявляются лишь периодически и на которые обращал внимание В.Л. Сывороткин, связаны с пульсационной дегазацией поля водорода, в котором главный вклад в дегазацию осуществляют крупные разломно-трещинные зоны, не охваченные специальными исследованиями. Если бы по этому региону удалось организовать газовый мониторинг предварительно изученных магистральных разломно-трещинных зон и геодинамического их состояния (растяжения—сжатия, поднятия—опускания), все стало бы на свои места. В других случаях, как, например, в зоне индонезийского землетрясения 2004 г., такое соответствие и правота В.Л. Сывороткина (с учетом выявленных ранее аномальных дегазаций водорода, связанных с землетрясениями) становится очевидными. Подтверждения и дальнейшее развитие представлений о

связи активной глубинной дегазации водорода с поведением ядра Земли, а также его влиянием на внешние оболочки планеты мы находим в интересных работах [Ретейом, 2018 и др.]. Вклад этих пульсационных гигантских выбросов водорода из недр (с учетом ежегодного значительного количества землетрясений на нашей планете) весьма трудно поддается оценке, но он, по видимому, вносит значительные коррективы в общий баланс водорода, поступающего в атмосферу и уходящего в космос.

В связи со статистической обработкой данных для обоснования отсутствия увеличения концентрации водорода с глубиной стоило бы вспомнить некоторые изречения о статистике. Например, «факты — упрямая вещь, но статистика гораздо сговорчивее» (Ларенс Питер). В.В. Гордиенко в полном соответствии с этим изречением игнорирует факты, используя «сговорчивую» статистику. Он, в частности, не приемлет построения, подтверждающие возрастание концентрации водорода с глубиной в районе Витватерсранда, опубликованные в работе [Lin et al., 2005]. Но дело в том, что эта оценка не единична. Факты на основе тщательного исследования полевых и экспериментальных материалов мы обнаруживаем в фундаментальных работах Ф.А. Летникова и его коллег по месторождениям России, в детальном анализе полиметалльных и урановых месторождений Северного Казахстана и Саяно-Алтайского региона, тщательно изученных А.А. Поцелуевым [Поцелуев, 2014], в результатах кропотливых исследований, полученных С.П. Левшуновой по многим НГБ СНГ, в работе [Перчук, 1971] о подавляющем превышении концентраций водорода в алмазах больших глубин (~ 400 км) над концентрациями в алмазах, возникших на меньших глубинах (100—120 км). Можно собрать еще великое множество прямых и косвенных фактов, подтверждающих тенденцию увеличения концентрации водорода с глубиной. Почему же В.В. Гордиенко отбрасывает их, заменяя «сговорчивой» статистикой? Дело в том, что если серьезно, а не декларативно принять факт основной миграции во-

дорода в недрах по разломам и крупным оперяющим трещинам, то тогда следует признать, что нахождение таких разрывов в породах, вскрытых скважиной, будет не частым. Отбор газов, как правило, не привязан к местам таких выходов, что приводит к смазыванию пиков концентраций, даже если они скважиной встречены. Целевое назначение скважин обычно не связано лишь с выявлением разломно-трещинных зон, и их забои останавливаются чаще всего ниже таких зон. А это приводит к снижению концентрации водорода, выходящего из трещинной зоны и замеряемого ниже по стволу, если эта зона вскрыта скважиной на меньшей глубине. Но главная «изюминка» приведенной статистики заключается в том, что в ней охвачен интервал глубин всего до 800 м. В упомянутых выше работах, да и у самого В.В. Гордиенко при анализе условий дегазации в ДДВ рассматриваются гораздо большие глубины. Что касается небольших глубин, то кроме смазывания фактических данных дегазации по основным газопроводящим трещинам, фиксируемой скважинами, следует иметь в виду, что процессы биологического поглощения и химического окисления водорода могут в зависимости от конкретных условий достигать значительных масштабов и поэтому полученные данные не являются показательными, особенно за пределами разломов. Об этом, кстати, писал и сам В.В. Гордиенко, но почему-то не использовал эти знания для объяснения своей статистики. В общем, как правильно отмечал в свое время Уильям Уотт, «не принимай на веру того, что говорит статистика, пока тщательно не изучишь, о чем она умалчивает».

Заключение. Поскольку основной целью нашего сотрудничества с коллегами из Института геофизики НАН Украины, успешно начатого в 2019 г. [Shestopalov et al., 2019] в рамках неформального творческого коллектива по выполнению соответствующих проектов, являются не столько общенаучные проблемы водорода в недрах, сколько сугубо прикладная задача определения перспектив поиска месторождений водо-

рода в Украине, считаю важным высказать следующие соображения.

1. Безусловно, образование водорода в значительных объемах в недрах и его устойчивая сохранность является сложнейшей проблемой, которая в связи с новизной и слабой изученностью на этом этапе исследований представляется не менее, если не более трудной, чем углеводородный комплекс проблем.

2. На современном этапе исследований сложились две группы основных гипотез, с которыми могут быть связаны какие-либо перспективы нахождения крупных скоплений водорода в недрах:

- а) гипотезы, связывающие преимущественное возникновение водорода в результате разложения воды при контакте с двухвалентным железом существенно оливиновых пород и т. п., приводящим к широко встречающейся серпентинизации пород, а также с радиолитом воды. В верхах верхней мантии процесс водородообразования связывается с магматической активизацией переработки пород с выделением водорода;
- б) гипотезы, которые признавая коровые и верхнемантийные процессы вторичного водородообразования, большое значение придают активной миграции водорода из ядра и нижней мантии Земли. Водород, сконцентрированный в ядре, является первичным, накопившимся в процессе аккреции планеты. Гипотезы глубинного водорода предполагают, что часть выносимой из недр энергии конвективная, существенно усиливаемая термохимическими взрывными процессами и в основном не учитывается геотермометрами, нацеленными на мониторинг теплопроводного переноса энергии. Если объекты для исследования первой группы гипотез в той или иной мере доступны и в значительной мере изучены в виде различных проявлений на относительно небольших глубинах, то для изучения проявлений более глубинного водорода необходимо преодоление гораздо больших трудностей. Имеющиеся подтверждения его

существования в основном связаны с интегральными мощными его воздействиями на поверхностные и атмосферные объекты, на специфическое минералообразование в зонах формирования некоторых рудных и углеводородных месторождений, а также со сведениями об условиях образования алмазов в мантии на разных глубинах.

3. В рамках работы 2019 г., которую наша группа (А.Е. Лукин, В.М. Шестопалов, А.Н. Пономаренко, И.Л. Колябина и др.) выполняла параллельно с исследованиями в Институте геофизики, было акцентировано внимание на разработках Б.В. Олейникова, М.И. Новгородовой, А.Е. Лукина и других, обнаруживших образование самородного алюминия (СА) в породах разного генезиса и, прежде всего, в некоторых месторождениях углеводородов (Лелякивское и Гнедыщенское в ДДВ, Куюмбинское в Восточной Сибири, Таллинское в Западной Сибири и др.). Было обосновано [Олейников и др., 1981; Новгородова 1983; Лукин, 2006 и др.] и подтверждено, что оксифильные металлы в самородном виде и в первую очередь СА не могут отлагаться и кристаллизоваться в присутствии воды и уголекислоты. Возникновение СА должно быть связано с суперглубинными исключительно водородно-углеводородными флюидами. В связи с изменением в дальнейшем геохимических условий значительная часть СА вступает в различные реакции и преобразуется, и лишь некоторая часть покрывается оксидной пленкой и сохраняется. Анализ состава и строения сферул диаметром 20—130 мкм, обнаруживаемых в кавернах вторичных карбонатных пород коллекторов-метасомативов Куюмбинского месторождения (Восточная Сибирь), также показал, что наличие на них самородножелезной оболочки свидетельствует как минимум о двухфазном их образовании: начальный гидротермальный раствор, сформировавший их внутреннюю часть сменился на следующем этапе безводным водородно-метановым газом высокого давления [Лукин, 2009]. Можно привести еще ряд данных в пользу функ-

ционирования таких процессов. Таким образом, судя по этим результатам, главные фазы формирования крупных скоплений углеводородов и водорода в осадочно-метаморфической части коры связаны с внедрением глубинных безводных восстановленных флюидов из мантии.

4. В соответствии с предположением Р.М. Юрковой [Юркова и др., 1982; Юркова, 2002], с помощью метода термодинамического моделирования нами [Шестопалов, Колябина, 2019] было впервые теоретически показано, что возможен не только процесс серпентинизации оливина с разложением воды и образованием водорода, но и воздействие водорода на оливин с промежуточным образованием воды и серпентинизацией оливина. Другими словами, в случае воздействия безводного глубинного водородсодержащего флюида может образовываться вода и развиваться серпентинизация оливина. Конечно, эти результаты нуждаются в экспериментальном подтверждении, но судя по уже имеющейся практике, оно будет получено. Установленный нами результат хорошо согласуется с выводами по итогам исследований крупных алмазов, приведенными в работе [Smith et al., 2016].

5. Есть и другие доводы в пользу существования сверхглубинной дегазации водорода в недрах. Но пока эта гипотеза не имеет прямых доказательств (остаются неопределенности относительно характера дегазации в нижней мантии и из нижней мантии в верхнюю, длительности импульсных внедрений флюидов в земную кору, интенсивности, частоты и характера современного внедрения глубинного водорода в пределах относительно спокойных платформ, соотношения субвертикальной и латеральной направленности миграции глубинного водорода в коре в зависимости от различных условий и другие вопросы), мы должны подходить к проблеме поиска больших скоплений водорода в недрах с консервативных позиций и смотреть, что максимально объединяет конкурирующие (с точки зрения генезиса) гипотезы.

6. Объединяют их основные пути транспорта водорода. Это глубинные разломы

преимущественно мантийного заложения, расположенные в зонах современной активизации с соответствующими показателями геофизических полей. Территории первостепенного изучения также определяются набором геофизических, геологических и других показателей, охарактеризованных в ряде работ [Старостенко и др., 2014; Шестопалов и др., 2018; Гордиенко и др., 2020 и др.]. В частности, в пределах равнинных территорий показателем дегазационной активности разломов служит скопление западин. Но эта активность является периодической, что требует специального изучения. Поэтому сами западины еще не являются показателями, гарантирующими устойчивую во времени значительную по дебиту дегазацию водорода. Их изучение должно быть включено в обширный комплекс исследований. Уже известные наборы показателей, естественно, будут дополняться и углубляться в процессе дальнейших работ. Нам представляется весьма важным к информации по земной коре и верхней мантии добавлять в соответствующем масштабе данные по верхней части нижней мантии, получаемые с помощью сейсмотомографии и других методов, и анализировать их совместно.

7. Важной является разработка представлений о потенциальных емкостях промежуточного накопления водорода, поступающего из глубинного источника. Можно допустить, что в случае стабильного поступления и производства водорода отбор его может производиться непосредственно из транспортной системы, т. е. из разломной зоны. Но это, по-видимому, возможно лишь при стабильном поступлении и значительном расходе водорода, что в условиях Украины (территории с умеренной активизацией геолого-геофизических процессов) может оказаться не реалистичным.

8. Поэтому, несмотря на повышенную миграционную способность водорода, целесообразно выявлять и изучать в перспективных приразломных зонах системы емкостей и относительно слабопроницаемых покрышек. В этом отношении месторождение в Мали демонстрирует именно

такую систему промежуточного накопления водорода в этажной системе слоев терригенных проницаемых пород, разделенных долеритовыми, относительно слабопроницаемыми пластами, которые, судя по результатам опробования западин над ними, не останавливают восходящую миграцию водорода, но ослабляют ее.

9. Таким образом, практическая постановка задачи позволяет объединить усилия скептиков и оптимистов, сторонников существования сверхглубинного первичного водорода и вторичного водорода, формирующегося в основном в земной ко-

ре и верхней мантии. Насколько геолого-геофизические условия формирования месторождения водорода в Мали лучше или адекватны соответствующим условиям в Украине, при всем их разнообразии в последней, покажет практика. Но в случае удачи польза для страны, ее прогресса, геолого-геофизической науки и практики будет весьма весомой. Поэтому для успеха дела объединение усилий специалистов различного профиля, специализации и отношения к возможности решения этой проблемы, но нацеленных на исследования, играет исключительно важную роль.

Список литературы

- Арясова О.В., Хазан Я.М. От глобальной тектоники к глобальной геодинамике. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 5. С. 71—97. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147475>.
- Арясова О.В., Хазан Я.М. Взаимодействие мантийной конвекции с литосферой и происхождение кимберлитов. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 5. С. 150—173. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i5.2013.116445>.
- Баранов М.И. Приближенный расчет магнитного поля Земли. *Электротехника и электроника.* 2010. Т. 6. С. 46—48.
- Безбородов А.А., Гусев Н.В., Суслов И.Р., Фоломеев В.И. Природный ядерный реактор в недрах Земли. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2008. № 1. С. 30—40.
- Безруков Л.Б., Заварзина В.П., Курлович А.С., Лубсандаржиев Б.К., Межох А.К., Моргалюк В.П., Синев В.В. Геонейтринно и тепловой поток Земли. *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 2018. Т. 49. Вып. 4. С. 1191—1199.
- Белов С.В. Водородная дегазация планеты: анализ вулканических структур. *Око планеты.* 2011. Режим доступа: <https://oko-planet.su/phenomen/phenomenscience/93242-vodorodnaya-degazaciya-planety-analiz-vulkanicheskikh-struktur.html>.
- Вадковский В.Н. Субвертикальные скопле-
- ния гипоцентров землетрясений — сейсмические «гвозди». *Вестник ОНЗРАН.* 2012. Т. 4. NZ1001. <https://doi.org/10.2205/2012NZ000110>.
- Вадковский В.Н. Природа и механизм сейсмических «гвоздей»: *Тез. докл. «Ломоносовские чтения 1996 г.»*. Москва: Изд-во Москов. ун-та, 1996. С. 63—64.
- Гордиенко В.В. Источники водорода для месторождений углеводородов: *Тезисы докладов 8-х Кугрявцевских чтений.* Москва: Изд. ЦГЭ, 2020.
- Гордиенко В.В. Тепловые процессы, геодинамика, месторождения. 2017. 285 с. Режим доступа: <https://ivangord2000.wixsite.com/tecoos>.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Гордиенко Л.Я., Завгородняя О.В., Логвинов И.М., Тарасов В.Н. Зоны современной активизации территории Украины. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 2. С. 29—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i2.2020.201740>.
- Гуфельд И.Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией. *Геодинамика и тектонофизика.* 2012. № 3(4). С. 417—435. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0083>.
- Гуфельд И.Л. О глубинной дегазации и структуре литосферы и верхней мантии. *Глубинная нефть.* 2013. Т. 1. № 2. С. 171—188.

- Добрецов Н.Л. Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек. *Докл. РАН*. 1997. Т. 357. № 6. С. 797—800.
- Иванов А.В. Глубинная геодинамика: границы процесса по геохимическим и петрологическим данным. *Геодинамика и тектонофизика*. 2010. Т. 1. №. 1. С. 87—102. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-1-0008>.
- Житнуев Н.С. Трансмантийные флюидные потоки и происхождение плюмов. *Докл. РАН*. 2012. Т. 444. № 1. С. 50—55.
- Кирдяшкин А.А., Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г. Тепло- и массообмен в термохимическом плюме, расположенном под океанической плитой вдали от оси срединно-океанического хребта. *Физика Земли*. 2008. № 6. С. 17—30.
- Киркинский В.А., Новиков Ю.А. Компьютерное моделирование ядерных реакций водорода в кристаллических веществах и проблема нуклеосинтеза в геохимических процессах: Докл. ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии в Институте геохимии и аналитической химии РАН, 20—21 апреля 1999 г. *Вестник ОГГГН РАН*. 2000. Т. 2. № 2(12). Retrieved from http://geo.web.ru/conf/khitariada/2-2000.2/planet_3.pdf.
- Копничев Ю.Ф. Вариации поля поглощения поперечных волн перед сильными землетрясениями Северного Тянь-Шаня. *Докл. РАН*. 1997. Т. 356. № 4. С. 528—532.
- Кривицкий В.А. Парадоксы трансмутации и развитие Земли. Неочевидные доказательства. Москва: Академика, 2016. 239 с.
- Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах. *Физика Земли*. 2012. № 1. С. 3—19.
- Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). Москва: Агар, 2005. 247 с.
- Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза. *Геология рудных месторождений*. 2001. № 4. С. 291—307.
- Летников Ф.А. Глубинные флюиды континентальной литосферы: *Материалы Всероссийского совещания «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы*. Иркутск: Изд. Ин-та земной коры СО РАН, 2015. С. 11—22.
- Лукин А.Е. Инъекции глубинного углеводородно-полиминерального вещества в глубоководоносных породах нефтегазоносных бассейнов: природа, прикладное и гносеологическое значение. *Геол. журн.* 2000. № 2. С. 7—21.
- Лукин А.Е. Самородные металлы и карбиды — показатели состава глубинных геосфер. *Геол. журн.* 2006. № 4. С. 17—46.
- Лукин А.Е. Самородно-металлические микро- и нановключения в формациях нефтегазоносных бассейнов — трассеры суперглубинных флюидов. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 2. С. 61—92.
- Лукин А.Е. Система «суперплюм — глубоководоносные сегменты нефтегазоносных бассейнов» — неисчерпаемый источник углеводородов. *Геол. журн.* 2015. № 2. С. 7—20.
- Лукин А.Е., Шестопалов В.М. От новой геологической парадигмы к задачам региональных геолого-геофизических исследований. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 4. С. 3—72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140610>.
- Макаренко А.Н. Космический источник энергии в недрах Земли и планет. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 199 с. Режим доступа: <http://planetary-cosmic-heater.inf.ua/files/makarenko-978-3-659-64215-9.pdf>.
- Маракушев А.А. Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. Москва: Наука, 1999. 253 с.
- Мервозединов Д.Р., Батраков Г.Ф., Лукашин И.Ф. Ядерный терроризм и возможные природные радиоизотопные аномалии. *Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. НАН Украины*. Севастополь: Изд. МГИ, 2005. С. 220—228.
- Молчанов В.И. Генерация водорода в литогенезе. Новосибирск: Наука, 1981. 142 с.
- Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. Москва: Наука, 1983. 287 с.

- Олейников Б.В. Металлизация магматических расплавов и ее петрологические и рудогенетические следствия. В кн.: Самоходное минералообразование в магматическом процессе. Якутск: Изд. Якутск. филиала СО АН СССР, 1981. С. 5—11.
- Осика Д.Г. Флюидный режим сейсмически активных областей. Москва: Наука, 1981. 203 с.
- Перчук Л.Л. Флюиды в нижней коре и верхней мантии Земли. *Вестник Московского ун-та. Сер. 4. Геология*. 1971. Вып. 4. С. 25—35.
- Петров Ю.В., Назаров А.И., Онегин М.С., Петров В.Ю., Сахновский Э.Г. Нейтроннофизический расчет свежей зоны природного ядерного реактора Окло. *Атомная энергия*. 2005. Т. 98. Вып. 4. С. 306—316.
- Портнов А.В. Вулканы — месторождения водорода. *Промышленные ведомости*. 2010. № 10-12. Режим доступа: <https://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2015>.
- Поцелуев А.А. благороднометальное оруденение в гидротермальных и редкометальных месторождениях Центральной Азии. Томск: СТТ, 2014. 282 с.
- Родкин М.В. Пунанова С.А. Оценка влияния коровых процессов на формирование микроэлементного состава каустобиолитов: *Тезисы 4-х Кудрявцевских чтений*. Москва: Изд. ЦГЭ. 2015.
- Ретеюм А.Ю. Глубинная дегазация как ведущий эндогенный процесс. *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2018. Вып. 4(23). 7 с. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art43.
- Рябчиков И.Д. Высокие содержания никеля в мантийных магмах как свидетельство миграции вещества из земного ядра. *Докл. РАН*. 2003. Т. 389. № 5. С. 677—680.
- Семененко Н.П. Кислородно-водородная модель Земли. Киев: Наук. думка, 1990. 240 с.
- Сергеев В.Н. Распределение радиоактивных элементов, определяющих радиогенное тепло земли в ее недрах и геонейтринно. В кн.: Динамические процессы в геосферах: Сб. науч. трудов ИДГ РАН. Вып. 7. Москва: ГЕОС, 2015. С. 193—199.
- Склярлов А.Ю. Сенсационная история Земли. Москва: Вече, 2012. 256 с.
- Старостенко В.И., Лукин А.Е., Цветкова Т.А., Заец Л.Н., Донцов В.В., Савиных Ю.В. Об участии суперглубинных флюидов в нефтегенезе (по данным изучения уникального нефтяного месторождения Белый Тигр). *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 4. С. 3—32. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i4.2011.116893>.
- Старостенко В.И., Лукин А.Е., Цветкова Т.А., Шумлянская А.А. Геофлюиды и современное проявление активизации Ингульского мегаблока Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 5. С. 3—25. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i5.2014.111567>.
- Суханова Н.И., Трофимов С.Я., Полянская Л.М., Ларин Н.В., Ларин В.Н. Изменение гумусного состояния и структуры микробной биомассы в местах водородной эксгаляции. *Почвоведение*. 2013. № 2. С. 1—11. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020147>.
- Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. Москва: ООО «Геоинформцентр», 2002. 250 с.
- Сывороткин В.Л. Катастрофическая эпоха водородной дегазации. *Редкие Земли*. 2018. №. 9. С. 32—39.
- Терез Э.И., Терез И.Э. Реакция синтеза — основной источник внутренней энергии Земли. *Вестник РАН*. 2015. Т. 85. № 3. С. 240—246.
- Тимурзиев А.И. Закономерности пространственно-стратиграфического распределения заежей нефти и газа Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на основе представлений об их глубинном генезисе, молодом возрасте и новейшем времени формирования. *Глубинная нефть*. 2013. Т. 1. № 11. С. 1720—1759.
- Трубицын В.П., Харыбин Е.В. Термохимические мантийные плюмы. *Докл. РАН*. 2010. Т. 435. № 5. С. 683—685.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец А.Н. Сейсмическая визуализация плюмов и сверхглубинных флюидов в мантии под территорией Украины. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 4. С. 42—54. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506>.

- Хаин В.Е. Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики земли. *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 6. С. 753—760.
- Чакмазян К.В. Изменение структуры микробной биомассы почв в условиях залежи и эмиссии водорода: Дис. ... канд. биол. наук. Москва: МГУ, 2016. 113 с.
- Шевченко В.И., Арефьев С.С., Лукк А.А. Близвертикальные скопления очагов землетрясений, не связанные с тектонической структурой земной коры. *Физика Земли*. 2011. № 4. С. 16—38.
- Шестоपालов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. Очерки дегазации Земли. Киев, 2018. 632 с.
- Шестоपालов В.М., Колябіна І.Л. Попередні результати аналізу можливості серпентинізації олівину за відсутності води: *Зб. тез наукової конференції «Здобутки і перспективи розвитку геологічної науки в Україні»*. Київ: Вид. НАНУ, ІГМР, 2019. Т. 1. С. 120—121.
- Шуколюков Ю.А. Аномальный ксенон Земли. *Соросовский образовательный журнал*. 1997. № 9. С. 63—70.
- Юркова Р.М. Подъем и преобразование мантийных углеводородных флюидов в связи с формированием офиолитового диапира: *Материалы конференции «Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ»*. Москва: ГЕОС, 2002. С. 278—280.
- Юркова Р.М., Слонинская М.Л., Дайняк Б.А., Дриц В.А. Водород и метан в серпентинах различных генетических типов (на примере Сахалина и Корякского нагорья). *Докл. АН СССР*. 1982. Т. 263. Вып. 2. С. 420—425.
- Agostini, M., Appel, S., Bellini, G., Benziger, J., Bick, D., Bonfini, G. et al. (2015). Spectroscopy of geo-neutrinos from 2056 days of Borexino data. *Physical Review D*, 92(3), 031101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.031101>.
- Agostini, M., Altenmüller, K., Appel, S., Atroshchenko, V., Basilico, D., Bellini, G.B. et al. (2020). Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino. *Physical Review D*, 101(1), 012009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.012009>.
- Anderson, D.L. (2000). The statistics of helium isotopes along the global spreading ridge system and the central limit theorem. *Geophysics Research Letters*, 27(16), 2401—2404. <https://doi.org/10.1029/1999GL008476>.
- Anderson, O.L. (2002). The power balance at the core-mantle boundary. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 131(1), 1—17. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(02\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00009-2).
- Anderson, D.A. (2009). Energetics of the Earth and the Missing Heat Source Mystery. *Mantle Plumes*. Retrieved from <http://www.mantleplumes.org/Energetics.html>.
- Araki, T., Enomoto, S., Furuno, K. et al. (2005). Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND. *Nature*, 436, 499—503. <https://doi.org/10.1038/nature03980>.
- Barbier, S., Huang, F., Andreani, M., Tao, R., Hao, J., Eleish, A., Prabhu, A., Minhas, O., Fontaine, K., Fox, P., & Daniel, I.A. (2020). Review of H₂, CH₄, and Hydrocarbon Formation in Experimental Serpentinization Using Network Analysis. *Frontiers in Earth Science*, 8, 209. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00209>.
- Bellini, G., Ianni, A., Ludhova, L., Mantovani, F., & McDonough, W.F. (2013). Geo-Neutrinos. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 73, 1—34. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2013.07.001>.
- Conrad, R., & Seiler, W. (1979). The role of hydrogen bacteria during decomposition of hydrogen by soil. *FEMS Microbiology Letters*, 6, 143—145.
- Cowan, G.A. (1976). A Natural Fission Reactor. *Scientific American*, 235, 36—47.
- Davies, J.H., & Davies, D.R. (2009). Earth's surface heat flux. *Solid Earth*, 1(1), 5—24. <http://dx.doi.org/10.5194/se-1-5-2010>.
- Deyg, R., Kishore, K., Moorthy, P.N., et al. (1990). *Water radiolysis at high temperatures and pressures*. Bombay: Bhabha Atomic Research Centre, 27 p.
- De Koker, N., Neumann, G.S., & Vicek, V. (2012). Electrical resistivity and thermal conductivity of liquid Fe alloys at high *P* and *T*, and heat flux in Earth's core. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 109(11), 4070—

4073. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1111841109>.
- De Meijer, R.J., van der Graaf, E., & Jungmann, K. (2004). Impact and Application: Quest for a nuclear georeactor. *Nuclear Physics News*, 14(2), 20—25. <https://doi.org/10.1080/10506890491034776>.
- Dye, S.T. (2012). Geoneutrinos and radioactive power of the Earth. *Reviews of Geophysics*, 50, RG3007. <https://doi.org/10.1029/2012RG000400/>.
- Gando, A., Gando, Y., Ichimura, K., et al. (2011). Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. *Nature Geosciences*, 4, 647—651. <https://doi.org/10.1038/ngeo1205>.
- Gando, A., Gando, Y., Hanakago, H., Ikeda, H., Inoue, K. (2013). Reactor on-off Antineutrino Measurements with KamLAND. *Physical Review D*, 88, 033001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.033001>.
- Gilat, A.L., & Vol, A. (2005). Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. *HAIIT Journal of Science and Engineering B*, 2(1-2), 125—167.
- Gilat, A.L., & 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>.
- Herndon, J.M. (1993). Feasibility of a nuclear fission reactor at the center of the Earth as the energy source for the geomagnetic field. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45(5), 423—437. <https://doi.org/10.5636/jgg.45.423>.
- Herndon, J.M. (2003). Nuclear georeactor origin of oceanic basalt $^3\text{He}/^4\text{He}$, evidence and implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 100(6), 3047—3050. <https://doi.org/10.1073/pnas.0437778100>.
- Herndon, J.M. (2009). *Uniqueness of Herndon's Georeactor: Energy Source and Production Mechanism for Earth's Magnetic Field*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/0901.4509>.
- Hernlund, J.W., Thomas, C., & Tackley, P.J. (2005). A doubling of the post-perovskite phase boundary and structure of the Earth's lowermost mantle. *Nature*, 434, 882—886. <https://doi.org/10.1038/nature03472>.
- Holm, N.G., Oze, C., Mousis, O., Waite, J.H., & Guilbert-Lepoutre, A. (2015). Serpentinization and the formation of H_2 and CH_4 on celestial bodies (planets, moons, comets). *Astrobiology*, 15(7), 587—600. <https://doi.org/10.1089/ast.2014.1188>.
- Huang, R., Lin, C., Sun, W., Ding, X., Zhan, W., & Zhu, J. (2017). The production of iron oxide during peridotite serpentinization: Influence of pyroxene. *Geoscience Frontiers*, 8(6), 1311—1321. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.01.001>.
- Huang, Y., Chubakov, V., Mantovani, F., Rudnick, R.L., & McDonough, W.F. (2013). A reference Earth model for the heat-producing elements and associated geoneutrino flux. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(6), 2003—2029. <https://doi.org/10.1002/ggge.20129>.
- Hollenbach, D.F., & Herndon, J.M. (2001). Deep Earth reactor: Nuclear fission, helium, and the geomagnetic field. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 98(20), 11085—11090. <https://doi.org/10.1073/pnas.201393998>.
- Ikuta, D., Ohtani E., Sano-Furakawa A., Shibazaki, Y., Terasaki, H., Yuan L., & Hattori, T. (2019). Interstitial hydrogen atoms in face-centered cubic iron in the Earth's core. *Scientific Reports*, 9, 7108. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43601-z>.
- Isaev, E.I., Skorodumova, N.V., Ahuja, R., Vekilov, Yu.K., & Johansson, B. (2007). Dynamic stability of Fe-H in the Earth's mantle and core regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104(22), 9168—9171. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609701104>.
- Jaupart, C., Labrosse S., Lucazeau, F., & Marschal, J. (2007). Temperatures, Heat and Energy in the Mantle of the Earth. In *Treatise on Geophysics* (Vol. 7, pp. 253—303).
- Jiang, S., He, M., Yue, W., Qi, B., & Liu, J. (2007). Observation of ^3He and ^3H in the volcanic crater lakes: possible evidence for natural nuclear fusion in deep Earth: 8th International Workshop on Anomalies in Hydrogen/Deuterium Loaded Metals. Sicily, Italy.

- Jiang, S., & He, M. (2012). Anomalous Nuclear Reaction in Earth's Interior: a New Field in Physics Science? *Plasma Science and Technology*, 14(5), 5438—5441. 1276. <https://doi.org/10.1126/science.1133280>.
- Jiang, S., Liu, J., & He, M. (2010). A possible in situ ^3H and ^3He source in Earth's interior: an alternative explanation of origin of ^3He in deep Earth. *Naturwissenschaften*, 97(7), 655—662. <https://doi.org/10.1007/s00114-010-0681-z>.
- Jones, V.T., & Pirkle, R.J. (1981). Helium and hydrogen soil gas anomalies associated with deep or active faults: *Proc. of the 1981 American Chemical Society Annual Meeting, Atlanta, GA*.
- Jones, S.E., & Ellsworth, J. (2003). Geo-fusion and Cold Nucleosynthesis: *Proc. of Tenth international conference on cold fusion. Cambridge, MA LENR-CANR.org*. Retrieved from <http://www.lenr-canr.org/acrobat/JonesSEgeo-fusiona.pdf>.
- Klein, F., Grozeva, N.G., & Seewald, I.S. (2019). Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine — hosted fluid inclusions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 116(36), 17666—17672. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1907871116.
- Konn, C., Charlou, J.L., Holm, N.G., & Mousis, O. (2015). The production of Methane, Hydrogen and Organic Compounds in Ultramafic — Hosted Hydrothermal Vents of the Mid-Atlantic Ridge. *Astrobiology*, 15(5), 381—399. <https://doi.org/10.1089/ast.2014.1198>.
- Kronig, R., de Boer, J., & Korringa, J. (1946). On the internal constitution of the Earth. *Physica*, 12(5), 245—256. [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(46\)80065-X](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(46)80065-X).
- Kuroda, P.K. (1956). On the nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals. *Journal of Chemical Physics*, 25, 781—782. <https://doi.org/10.1063/1.1743058>.
- Lay, T. (2015). Deep Earth Structure: Lower Mantle and D'' Rocks. In G. Schubert (Ed.), *Treatise on Geophysics* (Vol. 1, pp. 684—723). Oxford: Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-444-53802-4.00019-1.
- Lay, T., Hernlund, J., Garnero, E., & Thorne, M.S. (2006). A post-perovskite lens and D heat flux beneath the Central Pacific. *Science*, 314, 1272—
- Larin, V.N. (1993). *Hydridic Earth: The New Geology of Our Primordially Hydrogen-rich Planet*. Alberta: Polar Publishing, 247 p.
- Leng, W., & Zhong, S. (2008). Controls on plume heat flux and plume excess temperature. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B4), B04408. <https://doi.org/10.01029/02007JB005155>.
- Lin, Li-H., Hall, J., Lippmann-Pipke, J., Ward, J.A., Sherwood Lollar, B., DeFlaun, M., Rothmel, R., Moser, M., Gihring, T.M., Mislowack, B., & Onstott, T.C. (2005). Radiolytic H_2 in continental crust: Nuclear power for deep subsurface microbial communities. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(7), 3—13. <https://doi.org/10.1029/2004GC000907>.
- Lindenfeld, M., Rumpker, G., Link, K., Koehn, D., & Batte, A. (2012). Fluid-triggered earthquake swarms in the Rwenzori region, East African Rift — Evidence for rift initiation. *Tectonophysics*, 566-567, 95—104. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.010>.
- Malvoisin, B., Brantut, N., & Kaczmarek, M. (2017). Control of serpentinisation rate by reaction-induced cracking. *Earth and Planetary Science Letters*, 476, 143—152. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.042>.
- Mareschal, J.C., Jaupart, C., Phaneuf, C., & Perry, C. (2012). Geoneutrinos and the energy budget of the Earth. *Journal of Geodynamics*, 54, 43—54. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.10.005>.
- McCollom, T.M., & Bach, W. (2009). Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinisation of ultramafic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(3), 856—875. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.032>.
- McCollom, T.M., & Seewald, L.S. (2013). Serpentinites, hydrogen and life. *Elements*, 9(2), 129—134. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.129>.
- Meshik, A., & Herndon, J.M. (2001). Deep Earth reaction: Nuclear fission, helium, and the geomagnetic field. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 98(20), 11085—11090. <https://doi.org/10.1073/pnas.201393998>.

- Meshik, A., Hohenberg, C., & Pravdivtseva, O.V. (2004). Record of cycling operation of the natural nuclear reactor in the Oklo/Okelobondo area in Gabon. *Physical Review Letters*, 93(18), 182—190. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.182302>.
- Moody, J.B. (1976). Serpentinization: a review. *Lithos*, 9(2), 125—138. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(76\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0024-4937(76)90030-X).
- Mével, C. (2003). Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges. *Comptes Rendus Geosciences*, 335(10-11), 825—852. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.08.006>.
- Murphy, C.A. (2016). Hydrogen in the Earth's Core: Review of the Structural, Elastic and Thermodynamic Properties of Iron-Hydrogen Alloys. In *Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core* (pp. 253—264). <https://doi.org/10.1002/9781118992487.ch20>.
- Nivin, V.A. (2019). Occurrence Forms, Composition, Distribution, Origin and Potential Hazard of Natural Hydrogen-Hydrocarbon Gases in Ore Deposits of the Khibiny and Lovozero Massifs: A Review. *Minerals*, 9(9), 535. <https://doi.org/10.3390/min9090535>.
- Poirier, I. (1994). Light elements in the Earth's outer core: a critical review. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 85, 319—337. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90120-1).
- Pollack, H.N. et.al. (1993). Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics*, 31(3), 267—280. <https://doi.org/10.1029/93RG01249>.
- Pozzo, M., Davies, C., Gubbins, D., & Alfe, D. (2012). Thermal and electrical conductivity of iron at Earth's core conditions. *Nature*, 485, 355—358. <https://doi.org/10.1038/nature11031>.
- Quick, I.E., Hinkley, T.K., Reiner, G.V., & Hodge, C.E. (1991). Tritium concentration in the active Pu'uO'o crater, Kilauea volcano, Hawaii: implication for cold fusion in the Earth's interior. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 69(1-2), 132—137. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(91\)90159-F](https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90159-F).
- Rampino, M.R. (2015). Disk dark matter in the Galaxy and potential cycles of extraterrestrial impacts, mass extinctions and geological events. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448(2), 1816—1820. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2708>.
- Rohrbach, A., Ballhaus, C., Ulmer, P., Golla-Schindler, V., & Schonbohm, D. (2011). Experimental evidence for a reduced metal — saturated upper mantle. *Journal of Petrology*, 52(4), 717—731. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg101>.
- Rohrbach, A., Ballhaus, C., Golla-Schindler, V., Ulmer, P., Kamenetsky, V.S., & Kuzmin, D.V. (2007). Metal saturation in the upper mantle. *Nature*, 449, 456—458. <https://doi.org/10.1038/nature06183pmid:17898766>.
- Rumyantsev, V.N. (2016). Hydrogen in the Earth's outer core and its role in the deep Earth geodynamics. *Geodynamics and Tectonophysics*, 7(1), 119—135. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-1-0200>.
- Russell, M.J., Hall, A.J., & Martin, W. (2010). Serpentinization as a source of energy at the origin of life. *Geobiology*, 8(5), 355—371. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2010.00249.x>.
- Rusov, V.D., Pavlovich, V.N., Vaschenko, V.N., Tarasov, V.A., Zelentsova, T.N., Bolshakov, V.N., Litvinov, D.A., Kosenko, S.I., & Byegunova, O.A. (2007). Geoantineutrino spectrum and slow nuclear burning on the boundary of the liquid and solid phases of the Earth's core. *Journal of Geophysical Research*, 112(B9), B09203. <https://doi.org/10.1029/2005JB004212>.
- Sato, M., Sutton, A.L., McGee, K.A., & Russell-Robinson, S. (1986). Monitoring of hydrogen along the San Andreas and Calaveras faults in central California in 1980—1984. *Journal of Geophysical Research*, 91(B12), 1315—1326. <https://doi.org/10.1029/JB091iB12p12315>.
- Sherwood Lollar, J., Voglesonger, I.K., Lin, L-H., Lacrampe-Couloume, G., Telling, J., Abrajano, T.A., Onstott, T.C., & Pratt, L.M. (2007). Hydrogeologic Controls on Episodic H₂ Release from Precambrian Fractured Rocks-Energy for Deep Subsurface Life on Earth and Mars. *Astrobiology*, 7(6), 971—986. <https://doi.org/10.1089/ast.2006.0096>.
- Sherwood Lollar, B., Onstott, T., Lacrampe-Cou-

- loume, G., & Ballentine, C. (2014). The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H₂ production. *Nature*, 516, 379—382. <https://doi.org/10.1038/nature14017>.
- Shestopalov, V.M., Lukin, A.E., Starostenko, V.I., Gintov, O.B., & Rud, A.D. (2019). The prospects for hydrogen extraction from the Earth's interior: *Proc. of 16 International Conference «Hydrogen materials science and chemistry of carbon nanomaterials»*. Kyiv: KIM Publishing.
- Simkin, T., Under, J.D., Tilling, R.I., Vogt, P.R., & Spall, H. (1994). This dynamic planet: world map of volcanoes, earthquakes, impact Craters and plate tectonics: Explanatory Notes. *US Geological Survey in cooperation with the Smithsonian Institution*. Retrieved from <https://topex.ucsd.edu/erth01/DynamicPlanet.pdf>.
- Sleep, N.H., Meibom, A., Fridriksson, Th., Coleman, R.G., & Bird, D.K. (2004). H₂-rich fluids from serpentinization: geochemical and biotic implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 101(35), 818—823. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405289101>.
- Smith, E.M., Shirey, S.B., Nestola, F., Bullock, E.S., Wang, J., Richardson, S.H., & Wang, W. (2016). Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle. *Science*, 354, 1403—1405. <https://doi.org/10.1126/science.aall303>.
- Šrámek, O., McDonough, W.F., Kite, E.S., Lekić, V., Dye, S.T., & Zhong, S. (2013). Geophysical and geochemical constraints on geoneutrino fluxes from Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 361, 356—366. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.11.001>.
- Stevenson, D.I. (1977). Hydrogen in the Earth's core. *Nature*, 268, 130—131. <https://doi.org/10.1038/268130a0>.
- Sugisaki, R., Anno, H., Adashi, M., & Ui, H. (1980). Geochemical features of gases and rocks along active faults. *Geochemical Journal*, 14(3), 101—112. <https://doi.org/10.2343/geochemj.14.101>.
- Su, Q., Zeller, E., & Angino, E.E. (1992). Inducing action of hydrogen migrating along faults on earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 5(4), 841—847. <https://doi.org/10.1007/BF02651032>.
- Takai, K., Gamo, T., Tsunogai, U., Nakayama, N., Hirayama, H., Nealson, K.H., & Horikoshi, K. (2004). Geochemical and microbiological evidence for a hydrogen-based, hyper-thermophilic subsurface lithoautotrophic microbial ecosystem (Hyper SLIME) beneath an active deep sea hydrothermal field. *Extremophiles*, 8, 269—282. <https://doi.org/10.1007/s00792-004-0386-3>.
- Toulhoat, H., Beaumont, V., Zgonnik, V., Larin, N.V., & Larin, V.N. (2015). Chemical Differentiation of Planets: A Core Issue. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1208.2909>.
- Valyaev, B., & Dremin, I. (2013). Recycling of crustal matter and the processes of mantle—crust interaction in the genesis of hydrocarbon fluids: *International Conference on Gas Geochemistry, Patras, Greece, 1—7 September, Book of abstracts*. P. 32
- Vovk, I.F. (1987). Radiolytic salt enrichment and brine in the crystalline basement of the East European platform, in *Saline Water and Gases in Crystalline Rocks. Geological Association of Canada, Special Paper, 33*, 197—210.
- Wakita, H., Nakamura, V., Kita, I., Fujii, N., & Notsu, K. (1980). Hydrogen release, new indicator of fault activity. *Science*, 210, 188—190. <https://doi.org/10.1126/science.210.4466.188>.
- Wang, X.B., Ouyang, Z.Y., Zhuo, Sh.G., Zhang, M.F., Zheng, G.D., & Wang, Y.L. (2014). Serpentinization, abiogenic organic compounds, and deep life. *Science China, Earth Sciences*, 57(5), 878—887. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4821-8>.
- Walshe, J.L. (2006). Degassing of hydrogen from the Earth's core and related phenomena of the system Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18), A684—A684. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1490>
- Ware, R.N., Roecken, C., & Wyss, M. (1984). The detection and interpretation of hydrogen in fault gases. *Pure and Applied Geophysics*, 122(2-4), 392—402. <https://doi.org/10.1007/BF00874607>.
- Warr, O., Guinta, T., Ballentine, Ch. J., & Sherwood Lollar, B. (2019). Mechanisms and rates

- of He, Ar, and H₂ production and accumulation in fracture fluids in Precambrian Shield environments. *Chemical Geology*, 530, 119322. <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119322>.
- White, W.M. (2013). Radioactivity in the oceanic crust: *Proc. of the conference «Neutrino Geoscience 2013»*. Takayama. Japan. Retrieved from <http://www.awa.tohoku.ac.jp/geoscience2013/>.
- Worman, S.L., Pratson, L.F., Karson, J.A., & Klein, E.M. (2016). Global rate and distribution of H₂ gas produced by serpentinization within oceanic lithosphere. *Geophysical Research Letters*, 43, 6435—6443. <http://doi.org/10.1002/2016GL069066>.
- Zarifi, Z., & Havskov J. (2003). Characteristics of dense nests of deep and intermediate-depth seismicity. *Advances in Geophysics*, 46, 237—276. [10.1016/S0065-2687\(03\)46004-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(03)46004-4).
- Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>.
- Zhang, S., Lin, J., Wang, Y., Yang, G-Ch., Bergara, A., & Ma, Y. (2018). Nonmetallic FeH₆ under High Pressure. *Journal of Physical Chemistry*, 122(22), 12022—12028. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b04125>.
- Zhou, X., Du, J., Chen, Z., Cheng, J., Tang, Yi., Yang, L., Xie, C., Cui, Y., Liu, L., Yi, L., Yang, P., & Li, Y. (2010). Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake, southwestern China. *Geochemical Transactions*, 11, 5. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-11-5>.

On geological hydrogen

V.M. Shestopalov, 2020

Scientific and Engineering Center for Radiohydrogeo-ecological Polygon Research
of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kiev, Ukraine

Formation of geological (abiogenous) hydrogen in the interior is connected with two groups of hypotheses: production of secondary hydrogen in the Earth's crust and upper mantle as a result of its emission from water and some minerals as well as discharge of primary hydrogen from the core and lower mantle accumulated in the depths during accretion of the planet. Due to absence of direct access to considerable depths of the Earth's validation of lawfulness of existence of primary hydrogen in the deep interior is a very complicated problem. Indirect approval of the unity of the processes in geo-spheres is a concept of the Earth as a single open spontaneous system with emission of thermal energy in all its geo-spheres including the core. In this system there is an intergeospheric heat-mass transition which is in good agreement with concepts of plum tectonics. Additional approval of thermal energy generation at big depths experiments with geo-neutrino may become which are in progress and detection of tritium degassing from the craters of some volcanoes and in deep layers of volcanic lakes. The evidences of periodic power emission of deep hydrogen from the interior are the results of studies of V.L. Syvorotkin, A. Dzhylyat and A. Vol, A.Yu. Reteyum et al.

And the results of the studies of the state and changes of mineral medium in the areas as well as conditions of deep, location of many known oil and gas and metal deposits and diamonds give evidence of categorical importance of reducing (essentially hydrogenous) medium during their formation. The first thermodynamic calculations confirm the possibility of influence of primary hydrogen on olivine with following formation of water and serpentine. The efforts of computation of general hydrogen potential in oil-and-gas producing basins, the resources of the Dnieper-Donets depression as an example give an evidence of considerable resource potential of hydrogen on one side and on the other in relation to high reserve of unexplored resources of hydrocarbons they determine the reasonability of complex explorations for hydrocarbons and hydrogen. In connection with

absence of 100 % evidence of the hypothesis as to primary hydrogen and the uncertainty of special features of its possible degassing the studies of exploration of its deposits should be made in the fault zones which may guarantee ascending transport of large volumes of hydrogen according to any group of hypotheses mentioned above. They must be strong deep faults to which conformable volumes for intermediate accumulation of hydrogen are attracted and which are overlapped by weakly penetrative layers capable to slow the ascending hydrogen degassing.

Key words: geological secondary and primary hydrogen, heat flow, geo-reactor, tritium degassing, deep faults, native metals, hydrogen deposits.

References

- Aryasova, O.V., & Khazan, Ya.M. (2018). From global tectonics to global geodynamics. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(5), 71—97. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147475> (in Russian).
- Aryasova, O.V., & Khazan, Ya.M. (2013). Interaction of mantle convection with the lithosphere and the origin of kimberlites. *Geofizicheskiy zhurnal*, 35(5), 150—171. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i5.2013.116445> (in Russian).
- Baranov, M.I. (2010). Approximate calculation of the Earth's magnetic field. *Elektrotehnika i elektronika*, 6, 46—48 (in Russian).
- Bezborodov, A.A., Gusev, N.V., Suslov, I.R., & Folomeev, V.I. (2008). Natural Nuclear Reactor in the Earth's Interior. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, (1), 30—40 (in Russian).
- Bezrukov, L.B., Zavarzina, V.P., Kurlovich, A.S., Lubsandarzhiev, B.K., Mezhokh, A.K., Morgalyuk, V.P., & Sinev, V.V. (2018). Geoneutrino and heat flow of the Earth. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra*, 49(4), 1191—1199.
- Belov, S.V. (2011). Hydrogen degassing of the planet: analysis of volcanic structures. *Oko planet*. Retrieved from <https://oko-planet.su/phenomen/phenomscience/93242-vodorodnaya-degazaciya-planety-analiz-vulkanicheskikh-struktur.html> (in Russian).
- Vadkovsky, V. N. (2012). Subvertical congestions of the earthquake hypocenters — seismic «nails». *Vestnik ONZ RAN*, 4, NZ1001. <https://doi.org/10.2205/2012NZ000110> (in Russian).
- Vadkovsky, V.N. (1996). Nature and mechanism of seismic «nails»: *Abstracts of the conference «Lomonosov Readings 1996»* (pp. 63—64). Moscow: Moscow University Publ. House (in Russian).
- Gordienko, V.V. (2020). Hydrogen sources for hydrocarbon fields: *Abstracts of the 8th Kudryavtsev Readings*. Moscow: Publ. of the Central Geophysical Expedition (in Russian).
- Gordienko, V.V. (2017). *Thermal processes, geodynamics, deposits*. 285 p. Retrieved from <https://ivangord2000.wixsite.com/tectonos> (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Gordienko, L.Ya., Zavgorodnyaya, O.V., Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2020). Zones of recent activation of Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal*, 42(2), 29—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i2.2020.201740> (in Russian).
- Gufeld, I. L. (2012). Geological consequences of amorphization of the lithosphere and upper mantle structures, caused by hydrogen degassing. *Geodinamika i tektonofizika*, 3(4), 417—435. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0083> (in Russian).
- Gufeld, I.L. (2013). On deep degassing and structure of lithosphere and upper mantle. *Glubinnaya neft*, 1(2), 171—188 (in Russian).
- Dobretsov, N. L. (1997). Mantle superplumes as the cause of the main geological periodicity and global rearrangements. *Doklady RAN*, 357(6), 797—800 (in Russian).
- Zhitnuev, N.S. (2012). Transmantle fluid flows and the origin of plumes. *Doklady RAN*, 444(1), 50—55 (in Russian).
- Ivanov, A.V. (2010). Deep geodynamics: process boundaries according to geochemical and petrological data. *Geodinamika i tektonofizika*

- zika*, 1(1), 87—102. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-1-0008> (in Russian).
- Kirdyashkin, A.A., Dobretsov, N.L., Kirdyashkin, A.G. (2008). Heat and mass transfer in a thermochemical plume under an oceanic plate far from the mid-ocean ridge axis. *Fizika Zemli*, (6), 17—30 (in Russian).
- Kopnichev, Yu.F. (1997). Variations of transverse wave absorption field prior to the strong earthquakes in the Northern Tien Shan. *Doklady RAN*, 356(4), 528—532 (in Russian).
- Krivitskiy, V.A. (2016). *Paradoxes of Transmutation and Earth Development. Unobvious Evidence*. Moscow: Akademika, 239 p. (in Russian).
- Kuzmin, Yu.O. (2012). Deformation autowaves in fault zones. *Fizika Zemli*, (1), 3—19 (in Russian).
- Larin, V.N. (2005). *Our Earth (origin, composition, structure and evolution of primordially hydridic Earth)*. Moscow: Agar, 247 p. (in Russian).
- Letnikov, F.A. (2001). Ultradeep fluid systems of the Earth and problems of ore formation. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 43(4), 291—307 (in Russian).
- Letnikov, F.A. (2015). Deep fluids of the continental lithosphere. *Proceedings of the All-Russia conference «Fluid regime of endogenic processes in the continental lithosphere»* (pp. 11—22). Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS (in Russian).
- Lukin, A.E. (2000). Injections of deep hydrocarbon-polymineral substance in deep-lying rocks of oil-and- gas basins: nature, applied and epistemological significance. *Heolohichnyy zhurnal*, (2), 7—21 (in Russian).
- Lukin, A.E. (2006). Native metals and carbides — indicators of composition of deep geospheres. *Heolohichnyy zhurnal*, (4), 17—46 (in Russian).
- Lukin, A.E. (2009). Native-metal micro- and nano-inclusions in the formations of oil-and-gas basins — as tracers of super-deep fluids. *Geofizicheskiy zhurnal*, 31(2), 61—92 (in Russian).
- Lukin, A.E. (2015). The system «superplume — deep-lying segments of oil-and-gas basins» — inexhaustible source of hydrocarbons. *Heolohichnyy zhurnal*, (2), 7—20 (in Russian).
- Lukin, A.E., & Shestopalov, V.M. (2018). From new geological paradigm to the problems of regional geological geophysical studies. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(4), 3—72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140610> (in Russian).
- Makarenko, A.N. (2014). *Cosmic source of energy in the interior of the Earth and planets*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 199 p. Retrieved from <http://planetary-cosmic-heater.inf.ua/files/makarenko-978-3-659-64215-9.pdf> (in Russian).
- Marakushev, A.A. (1999). *Origin of the Earth and nature of its endogenous activity*. Moscow: Nauka, 253 p. (in Russian).
- Mervozedinov, D.R., Batrakov, G.F., & Lukashin, I.F. (2005). Nuclear terrorism and possible natural radioisotope anomalies. In *Collected works of NANU «Systems of environment control»* (pp. 220—228). Sevastopol: Publ. by the Marine Hydrophysical Institute (in Russian).
- Molchanov, V.I. (1981). *Hydrogen generation in lithogenesis*. Novosibirsk: Nauka, 142 p. (in Russian).
- Novgorodova, M.I. (1983). *Native metals in hydrothermal ores*. Moscow: Nauka, 287 p. (in Russian).
- Oleynikov, B.V. (1981). Metallization of magmatic melts and its petrological and ore-genetic consequences. In *Native minerals formation in magmatic process* (pp. 5—11). Yakutsk: Yakutsk bureau of SB AS USSR (in Russian).
- Osyka, D.G (1981). *Fluid regime in seismically active areas*. Moscow: Nauka, 203 p. (in Russian).
- Perchuk, L.L. (1971). Fluids in the lower crust and upper mantle of the Earth. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geologiya*, (4), 25—35 (in Russian).
- Petrov, Yu.V., Nazarov, A.I., Onegin, M.S., Petrov, V.Yu., Sakhnovsky, E.G. (2005). Computation of neutronics of fresh core for Oklo natural nuclear reactor. *Atomnaya Energiya*, 98(4), 306—316 (in Russian).

- Portnov, A.V. (2010). Volcanoes — natural hydrogen fields. *Promyshlennye vedomosti*, (10-12). Retrieved from <https://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2015> (in Russian).
- Potseluyev, A.A. (2014). *Noble-metal ore mineralization in hydrothermal uranium and rare metal deposits in the Central Asia*. Tomsk: STT Publishing, 282 p. (in Russian)
- Rodkin, M.V., & Punanova, S.A. (2015). Assessment of the influence of crustal processes on the formation of microelement composition of caustobiolites: *Abstracts of the 4th Kudryavtsev Readings*. Moscow: Publ. of the Central Geophysical Expedition (in Russian).
- Reteyum, A.Yu. (2018). Deep degassing as the leading endogenous process. *Aktualnye problemy nefti i gaza*, (4), 7 p. (in Russian).
- Ryabchikov, I.D. (2003). High content of nickel in the mantle magmas as evidence of substance migration from the Earth's core. *Doklady RAN*, 389(5), 677—680 (in Russian).
- Semenenko N.P. (1990). *Oxygen-hydrogen model of the Earth*. Kiev: Naukova Dumka, 240 p. (in Russian).
- Sergeev, V.N. (2015). Distribution of radioactive elements that determine radiogenic heat of the Earth in its interior and geoneutrino. In *Collected works of IDG RAS «Dynamic processes in geosheres»* (Is. 7, pp. 193—199). Moscow: GEOS (in Russian).
- Sklyarov, A.Yu. (2012). *Sensational history of the Earth*. Moscow: Veche Publishing. 256 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Lukin, A.E., Tsvetkova, T.A., Zaets, L.N., Dontsov, V.V. & Savinykh, Yu.V. (2011). On the participation of super-deep fluids in naftidogenesis (according to the study of the unique White Tiger oil field). *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(4), 3—32. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i4.2011.116893> (in Russian).
- Starostenko, V.I., Lukin, A.E., Tsvetkova, T.A. & Shumlyanskaya, A.A. (2014). Geofluids and present-day manifestation of activation of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(5), 3—25. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i5.2014.111567> (in Russian).
- Sukhanova, N.I., Trofimov, S.Y., Polyanskaya, L.M., Larin, N.V., & Larin, V.N. (2013). Changes in the humus status and the structure of the microbial biomass in hydrogen exhalation places. *Pochvovedenie*, (2), 1—11. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020147> (in Russian).
- Syvorotkin V.L. (2002). *Deep Earth degassing and global catastrophes*. Moscow: Geoinformtsentr, 250 p. (in Russian).
- Syvorotkin, V.L. (2018). Catastrophic epoch of hydrogen degassing. *Redkie Zemli*, (9), 32—39 (in Russian).
- Terez, E.I., & Terez, I.E. (2015). Fusion reactions as the main source of the internal energy of the Earth. *Vestnik RAN*, 85(3), 240—246 (in Russian).
- Timurziev, A.I. (2013). Laws of spatially-stratigraphic allocation of oil-and-gas accumulations within the West Siberian oil-and-gas bearing province on the basis of ideas about their deep origin, the young age and Middle-Late Neogene time of formation. *Glubinnaya neft*, 1(11), 1720—1759 (in Russian).
- Trubitsyn, V.P. & Kharybin, E.V. (2010). Thermochemical mantle plumes. *Doklady RAN*, 435(5), 683—685 (in Russian).
- Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., Zayets, A.N. (2017). Seismic visualization of plumes and super-deep fluids in mantle under Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal*, 39(4), 42—54. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506> (in Russian).
- Khain, V.E. (2010). Development of actual global model of the Earth's dynamics: basic principles. *Geologiya i Geofizika*, 51(6), 753—760 (in Russian).
- Chakmazyan, K.V. (2016). Changes in microbial biomass structure of soils under conditions of natural accumulation and emission of hydrogen: *Candidate's thesis*. Moscow, 113 p. (in Russian).
- Shevchenko, V.I., Arefiev, S.S. & Lukk, A.A. (2011). Subvertical clusters of earthquake hypocenters unrelated to the tectonic structure of the Earth's crust. *Fizika Zemli*, (4), 16—38 (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Lukin, A. Yu., Zgonik, V.A.,

- Makarenko, A.N., Larin, N.V. & Bohuslavsky, A.S. (2018). *Essays on Earth degassing*. Kiev, 632 p. (in Russian).
- Shestopalov, V.M., & Kolyabina, I.L. (2019). Preliminary results of analysis of possibility for serpentinization of olivine in the absence of water: *Abstracts of scientific conference «Achievements and development of geological science in Ukraine»* (Vol. 1, pp. 120—121). Kyiv: Publ. of the Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation (in Ukrainian).
- Shukolyukov, Y.A. (1997). Anomalous xenon of the Earth. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, (9), 63—70 (in Russian).
- Yurkova, R.M. (2002). Rise and transformation of mantle hydrocarbon fluids caused by formation of the ophiolite diaper: *Proceedings of the conference «Degassing of the Earth: Geodynamics, Geofluids, Oil-and-Gas»* (pp. 278—280). Moscow: GEOS (in Russian)
- Yurkova, R.M., Sloninskaya, M.L., Dainyak, B.A., & Dritz, V.A. (1982). Hydrogen and methane in serpentines of various genetic types (using Sakhalin and Koryak Highlands as examples). *Doklady AN SSSR*, 263(2), 420—425 (in Russian).
- Agostini, M., Appel, S., Bellini, G., Benziger, J., Bick, D., Bonfini, G. et al. (2015). Spectroscopy of geo-neutrinos from 2056 days of Borexino data. *Physicfl Review D*, 92(3), 031101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.031101>.
- Agostini, M., Altenmüller, K., Appel, S., Atrshchenko, V., Basilico, D., Bellini, G.B. et al. (2020). Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino. *Physical Review D*, 101(1), 012009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.012009>.
- Anderson, D.L (2000). The statistics of helium isotopes along the global spreading ridge system and the central limit theorem. *Geophysics Research Letters*, 27(16), 2401—2404. <https://doi.org/10.1029/1999GL008476>.
- Anderson, O.L. (2002). The power balance at the core-mantle boundary. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 131(1), 1—17. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(02\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00009-2).
- Anderson, D.A. (2009). Energetics of the Earth and the Missing Heat Source Mystery. *Mantle Plumes*. Retrieved from <http://www.mantleplumes.org/Energetics.html>.
- Araki, T., Enomoto, S., Furuno, K. et al. (2005). Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND. *Nature*, 436, 499—503. <https://doi.org/10.1038/nature03980>.
- Barbier, S., Huang, F., Andreani, M., Tao, R., Hao, J., Eleish, A., Prabhu, A., Minhas, O., Fontaine, K., Fox, P., & Daniel, I.A. (2020). Review of H₂, CH₄, and Hydrocarbon Formation in Experimental Serpentinization Using Network Analysis. *Frontiers in Earth Science*, 8, 209. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00209>.
- Bellini, G., Ianni, A., Ludhova, L., Mantovani, F., & McDonough, W.F. (2013). Geo-Neutrinos. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 73, 1—34. <https://doi.org/10.1016/j.pppnp.2013.07.001>.
- Conrad, R., & Seiler, W. (1979). The role of hydrogen bacteria during decomposition of hydrogen by soil. *FEMS Microbiology Letters*, 6, 143—145.
- Cowan, G.A. (1976). A Natural Fission Reactor. *Scientific American*, 235, 36—47.
- Davies, J.H., & Davies, D.R. (2009). Earth's surface heat flux. *Solid Earth*, 1(1), 5—24. <http://dx.doi.org/10.5194/se-1-5-2010>.
- Deyg, R., Kishore, K., Moorthy, P.N., et al. (1990). *Water radiolysis at high temperatures and pressures*. Bombay: Bhabha Atomic Research Centre, 27 p.
- De Koker, N., Neumann, G.S., & Vicek, V. (2012). Electrical resistivity and thermal conductivity of liquid Fe alloys at high *P* and *T*, and heat flux in Earth's core. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 109(11), 4070—4073. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1111841109>.
- De Meijer, R.J., van der Graaf, E., & Jungmann, K. (2004). Impact and Application: Quest for a nuclear georeactor. *Nuclear Physics News*, 14(2), 20—25. <https://doi.org/10.1080/10506890491034776>.
- Dye, S.T. (2012). Geoneutrinos and radioactive power of the Erth. *Reviews of Geophysics*, 50, RG3007. <https://doi.org/10.1029/2012RG000400/>.

- Gando, A., Gando, Y., Ichimura, K., et al. (2011). Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. *Nature Geosciences*, 4, 647—651. <https://doi.org/10.1038/ngeo1205>.
- Gando, A., Gando, Y., Hanakago, H., Ikeda, H., Inoue, K. (2013). Reactor on-off Antineutrino Measurements with KamLAND. *Physical Review D*, 88, 033001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.033001>.
- Gilat, A.L., & Vol, A. (2005). Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. *HAIT Journal of Science and Engineering B*, 2(1-2), 125—167.
- Gilat, A.L., & 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>.
- Herndon, J.M. (1993). Feasibility of a nuclear fission reactor at the center of the Earth as the energy source for the geomagnetic field. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45(5), 423—437. <https://doi.org/10.5636/jgg.45.423>.
- Herndon, J.M. (2003). Nuclear georeactor origin of oceanic basalt $^3\text{He}/^4\text{He}$, evidence and implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 100(6), 3047—3050. <https://doi.org/10.1073/pnas.0437778100>.
- Herndon, J.M. (2009). *Uniqueness of Herndon's Georeactor: Energy Source and Production Mechanism for Earth's Magnetic Field*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/0901.4509>.
- Hernlund, J.W., Thomas, C., & Tackley, P.J. (2005). A doubling of the post-perovskite phase boundary and structure of the Earth's lowermost mantle. *Nature*, 434, 882—886. <https://doi.org/10.1038/nature03472>.
- Holm, N.G., Oze, C., Mousis, O., Waite, J.H., & Guilbert-Lepoutre, A. (2015). Serpentinization and the formation of H_2 and CH_4 on celestial bodies (planets, moons, comets). *Astrobiology*, 15(7), 587—600. <https://doi.org/10.1089/ast.2014.1188>.
- Huang, R., Lin, C., Sun, W., Ding, X., Zhan, W., & Zhu, J. (2017). The production of iron oxide during peridotite serpentinization: Influence of pyroxene. *Geoscience Frontiers*, 8(6), 1311—1321. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.01.001>.
- Huang, Y., Chubakov, V., Mantovani, F., Rudnick, R.L., & McDonough, W.F. (2013). A reference Earth model for the heat-producing elements and associated geoneutrino flux. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(6), 2003—2029. <https://doi.org/10.1002/ggge.20129>.
- Hollenbach, D.F., & Herndon, J.M. (2001). Deep Earth reactor: Nuclear fission, helium, and the geomagnetic field. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 98(20), 11085—11090. <https://doi.org/10.1073/pnas.201393998>.
- Ikuta, D., Ohtani E., Sano-Furakawa A., Shibazaki, Y., Terasaki, H., Yuan L., & Hattori, T. (2019). Interstitial hydrogen atoms in face-centered cubic iron in the Earth's core. *Scientific Reports*, 9, 7108. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43601-z>.
- Isaev, E.I., Skorodumova, N.V., Ahuja, R., Vekilov, Yu.K., & Johansson, B. (2007). Dynamic stability of Fe-H in the Earth's mantle and core regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104(22), 9168—9171. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609701104>.
- Jaupart, C., Labrosse S., Lucazeau, F., & Marschal, J. (2007). Temperatures, Heat and Energy in the Mantle of the Earth. In *Treatise on Geophysics* (Vol. 7, pp. 253—303).
- Jiang, S., He, M., Yue, W., Qi, B., & Liu, J. (2007). Observation of ^3He and ^3H in the volcanic crater lakes: possible evidence for natural nuclear fusion in deep Earth: *8th International Workshop on Anomalies in Hydrogen/Deuterium Loaded Metals*. Sicily, Italy.
- Jiang, S., & He, M. (2012). Anomalous Nuclear Reaction in Earth's Interior: a New Field in Physics Science? *Plasma Science and Technology*, 14(5), 5438—5441.
- Jiang, S., Liu, J., & He, M. (2010). A possible in situ ^3H and ^3He source in Earth's interior: an alternative explanation of origin of ^3He in deep Earth. *Naturwissenschaften*, 97(7), 655—662. <https://doi.org/10.1007/s00114-010-0681-z>.
- Jones, V.T., & Pirkle, R.J. (1981). Helium and hydrogen soil gas anomalies associated with deep or active faults: *Proc. of the 1981 American Chemical Society Annual Meeting, Atlanta, GA*.

- Jones, S.E., & Ellsworth, J. (2003). Geo-fusion and Cold Nucleosynthesis: *Proc. of Tenth international conference on cold fusion. Cambridge, MA LENR-CANR.org*. Retrieved from <http://www.lenr-canr.org/acrobat/JonesSEgeo-fusiona.pdf>.
- Klein, F., Grozeva, N.G., & Seewald, I.S. (2019). Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine — hosted fluid inclusions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 116(36), 17666—17672. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1907871116.
- Konn, C., Charlou, J.L., Holm, N.G., & Mousis, O. (2015). The production of Methane, Hydrogen and Organic Compounds in Ultramafic — Hosted Hydrothermal Vents of the Mid-Atlantic Ridge. *Astrobiology*, 15(5), 381—399. <https://doi.org/10.1089/ast.2014.1198>.
- Kronig, R., de Boer, J., & Korringa, J. (1946). On the internal constitution of the Earth. *Physica*, 12(5), 245—256. [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(46\)80065-X](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(46)80065-X).
- Kuroda, P.K. (1956). On the nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals. *Journal of Chemical Physics*, 25, 781—782. <https://doi.org/10.1063/1.1743058>.
- Lay, T. (2015). Deep Earth Structure: Lower Mantle and D'' Rocks. In G. Schubert (Ed.), *Treatise on Geophysics* (Vol. 1, pp. 684—723). Oxford: Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-444-53802-4.00019-1.
- Lay, T., Hernlund, J., Garnero, E., & Thorne, M.S. (2006). A post-perovskite lens and D heat flux beneath the Central Pacific. *Science*, 314, 1272—1276. <https://doi.org/10.1126/science.1133280>.
- Larin, V.N. (1993). *Hydridic Earth: The New Geology of Our Primordially Hydrogen-rich Planet*. Alberta: Polar Publishing, 247 p.
- Leng, W., & Zhong, S. (2008). Controls on plume heat flux and plume excess temperature. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B4), B04408. <https://doi.org/10.01029/02007JB005155>.
- Lin, Li-H., Hall, J., Lippmann-Pipke, J., Ward, J.A., Sherwood Lollar, B., DeFlaun, M., Rothmel, R., Moser, M., Gihring, T.M., Mislowski, B., & Onstott, T.C. (2005). Radiolytic H₂ in continental crust: Nuclear power for deep subsurface microbial communities. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(7), 3—13. <https://doi.org/10.1029/2004GC000907>.
- Lindenfeld, M., Rumpker, G., Link, K., Koehn, D., & Batte, A. (2012). Fluid-triggered earthquake swarms in the Rwenzori region, East African Rift — Evidence for rift initiation. *Tectonophysics*, 566-567, 95—104. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.010>.
- Malvoisin, B., Brantut, N., & Kaczmarek, M. (2017). Control of serpentinisation rate by reaction-induced cracking. *Earth and Planetary Science Letters*, 476, 143—152. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.042>.
- Mareschal, J.C., Jaupart, C., Phaneuf, C., & Pery, C. (2012). Geoneutrinos and the energy budget of the Earth. *Journal of Geodynamics*, 54, 43—54. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.10.005>.
- McCollom, T.M., & Bach, W. (2009). Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinisation of ultramafic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(3), 856—875. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.032>.
- McCollom, T.M., & Seewald, L.S. (2013). Serpentinites, hydrogen and life. *Elements*, 9(2), 129—134. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.129>.
- Meshik, A., & Herndon, J.M. (2001). Deep Earth reaction: Nuclear fission, helium, and the geomagnetic field. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 98(20), 11085—11090. <https://doi.org/10.1073/pnas.201393998>.
- Meshik, A., Hohenberg, C., & Pravdivtseva, O.V. (2004). Record of cycling operation of the natural nuclear reactor in the Oklo/Okelobondo area in Gabon. *Physical Review Letters*, 93(18), 182—190. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.182302>.
- Moody, J.B. (1976). Serpentinization: a review. *Lithos*, 9(2), 125—138. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(76\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0024-4937(76)90030-X).
- Mével, C. (2003). Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges. *Comptes Rendus Geosciences*, 335(10-11), 825—852. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.08.006>.
- Murphy, C.A. (2016). Hydrogen in the Earth's

- Core: Review of the Structural, Elastic and Thermodynamic Properties of Iron-Hydrogen Alloys. In *Deep Earth: Physics and Chemistry of the Lower Mantle and Core* (pp. 253—264). <https://doi.org/10.1002/9781118992487.ch20>.
- Nivin, V.A. (2019). Occurrence Forms, Composition, Distribution, Origin and Potential Hazard of Natural Hydrogen-Hydrocarbon Gases in Ore Deposits of the Khibiny and Lovozero Massifs: A Review. *Minerals*, 9(9), 535. <https://doi.org/10.3390/min9090535>.
- Poirier, I. (1994). Light elements in the Earth's outer core: a critical review. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 85, 319—337. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90120-1).
- Pollack, H.N. et.al. (1993). Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics*, 31(3), 267—280. <https://doi.org/10.1029/93RG01249>.
- Pozzo, M., Davies, C., Gubbins, D., & Alfe, D. (2012). Thermal and electrical conductivity of iron at Earth's core conditions. *Nature*, 485, 355—358. <https://doi.org/10.1038/nature11031>.
- Quick, I.E., Hinkley, T.K., Reiner, G.V., & Hodge, C.E. (1991). Tritium concentration in the active Pu'uO'o crater, Kilauea volcano, Hawaii: implication for cold fusion in the Earth's interior. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 69(1-2), 132—137. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(91\)90159-F](https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90159-F).
- Rampino, M.R. (2015). Disk dark matter in the Galaxy and potential cycles of extraterrestrial impacts, mass extinctions and geological events. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448(2), 1816—1820. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2708>.
- Rohrbach, A., Ballhaus, C., Ulmer, P., Golla-Schindler, V., & Schonbohm, D. (2011). Experimental evidence for a reduced metal — saturated upper mantle. *Journal of Petrology*, 52(4), 717—731. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg101>.
- Rohrbach, A., Ballhaus, C., Golla-Schindler, V., Ulmer, P., Kamenetsky, V.S., & Kuzmin, D.V. (2007). Metal saturation in the upper mantle. *Nature*, 449, 456—458. <https://doi.org/10.1038/nature06183> pmid:17898766.
- Rumyantsev, V.N. (2016). Hydrogen in the Earth's outer core and its role in the deep Earth geodynamics. *Geodynamics and Tectonophysics*, 7(1), 119—135. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-1-0200>.
- Russell, M.J., Hall, A.J., & Martin, W. (2010). Serpentinization as a source of energy at the origin of life. *Geobiology*, 8(5), 355—371. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2010.00249.x>.
- Rusov, V.D., Pavlovich, V.N., Vaschenko, V.N., Tarasov, V.A., Zelentsova, T.N., Bolshakov, V.N., Litvinov, D.A., Kosenko, S.I., & Byegunova, O.A. (2007). Geoantineutrino spectrum and slow nuclear burning on the boundary of the liquid and solid phases of the Earth's core. *Journal of Geophysical Research*, 112(B9), B09203. <https://doi.org/10.1029/2005JB004212>.
- Sato, M., Sutton, A.L., McGee, K.A., & Russell-Robinson, S. (1986). Monitoring of hydrogen along the San Andreas and Calaveras faults in central California in 1980—1984. *Journal of Geophysical Research*, 91(B12), 1315—1326. <https://doi.org/10.1029/JB091iB12p12315>.
- Sherwood Lollar, J., Voglesonger, I.K., Lin, L-H., Lacrampe-Couloume, G., Telling, J., Abrajano, T.A., Onstott, T.C., & Pratt, L.M. (2007). Hydrogeologic Controls on Episodic H₂ Release from Precambrian Fractured Rocks-Energy for Deep Subsurface Life on Earth and Mars. *Astrobiology*, 7(6), 971—986. <https://doi.org/10.1089/ast.2006.0096>.
- Sherwood Lollar, B., Onstott, T., Lacrampe-Couloume, G., & Ballentine, C. (2014). The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H₂ production. *Nature*, 516, 379—382. <https://doi.org/10.1038/nature14017>.
- Shestopalov, V.M., Lukin, A.E., Starostenko, V.I., Gintov, O.B., & Rud, A.D. (2019). The prospects for hydrogen extraction from the Earth's interior: *Proc. of 16 International Conference «Hydrogen materials science and chemistry of carbon nanomaterials»*. Kyiv: KIM Publishing.
- Simkin, T., Under, J.D., Tilling, R.I., Vogt, P.R., & Spall, H. (1994). This dynamic planet: world map of volcanoes, earthquakes, impact Craters and plate tectonics: Explanatory Notes. *US Geological Survey in cooperation with the*

- Smithsonian Institution. Retrieved from <https://topex.ucsd.edu/erth01/DynamicPlanet.pdf>.
- Sleep, N.H., Meibom, A., Fridriksson, Th., Coleman, R.G., & Bird, D.K. (2004). H₂-rich fluids from serpentinization: geochemical and biotic implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 101(35), 818—823. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405289101>.
- Smith, E.M., Shirey, S.B., Nestola, F., Bullock, E.S., Wang, J., Richardson, S.H., & Wang, W. (2016). Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle. *Science*, 354, 1403—1405. <https://doi.org/10.1126/science.aall303>.
- Šrámek, O., McDonough, W.F., Kite, E.S., Lekić, V., Dye, S.T., & Zhong, S. (2013). Geophysical and geochemical constraints on geoneutrino fluxes from Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 361, 356—366. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.11.001>.
- Stevenson, D.I. (1977). Hydrogen in the Earth's core. *Nature*, 268, 130—131. <https://doi.org/10.1038/268130a0>.
- Sugisaki, R., Anno, H., Adashi, M., & Ui, H. (1980). Geochemical features of gases and rocks along active faults. *Geochemical Journal*, 14(3), 101—112. <https://doi.org/10.2343/geochemj.14.101>.
- Su, Q., Zeller, E., & Angino, E.E. (1992). Inducing action of hydrogen migrating along faults on earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 5(4), 841—847. <https://doi.org/10.1007/BF02651032>.
- Takai, K., Gamou, T., Tsunogai, U., Nakayama, N., Hirayama, H., Nealson, K.H., & Horikoshi, K. (2004). Geochemical and microbiological evidence for a hydrogen-based, hyper-thermophilic subsurface lithoautotrophic microbial ecosystem (Hyper SLIME) beneath an active deep sea hydrothermal field. *Extremophiles*, 8, 269—282. <https://doi.org/10.1007/s00792-004-0386-3>.
- Toulhoat, H., Beaumont, V., Zgonnik, V., Larin, N.V., & Larin, V.N. (2015). Chemical Differentiation of Planets: A Core Issue. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1208.2909>.
- Valyaev, B., & Dremin, I. (2013). Recycling of crustal matter and the processes of mantle—crust interaction in the genesis of hydrocarbon fluids: *International Conference on Gas Geochemistry, Patras, Greece, 1—7 September, Book of abstracts*. P. 32
- Vovk, I.F. (1987). Radiolytic salt enrichment and brine in the crystalline basement of the East European platform, in *Saline Water and Gases in Crystalline Rocks. Geological Association of Canada, Special Paper, 33*, 197—210.
- Wakita, H., Nakamura, V., Kita, I., Fujii, N., & Notsu, K. (1980). Hydrogen release, new indicator of fault activity. *Science*, 210, 188—190. <https://doi.org/10.1126/science.210.4466.188>.
- Wang, X.B., Ouyang, Z.Y., Zhuo, Sh.G., Zhang, M.F., Zheng, G.D., & Wang, Y.L. (2014). Serpentinization, abiogenic organic compounds, and deep life. *Science China, Earth Sciences*, 57(5), 878—887. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4821-8>.
- Walshe, J.L. (2006). Degassing of hydrogen from the Earth's core and related phenomena of the system Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18), A684—A684. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1490>
- Ware, R.N., Roecken, C., & Wyss, M. (1984). The detection and interpretation of hydrogen in fault gases. *Pure and Applied Geophysics*, 122(2-4), 392—402. <https://doi.org/10.1007/BF00874607>.
- Warr, O., Guinta, T., Ballentine, Ch. J., & Sherwood Lollar, B. (2019). Mechanisms and rates of He, Ar, and H₂ production and accumulation in fracture fluids in Precambrian Shield environments. *Chemical Geology*, 530, 119322. <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119322>.
- White, W.M. (2013). Radioactivity in the oceanic crust: *Proc. of the conference «Neutrino Geoscience 2013»*. Takayama, Japan. Retrieved from <http://www.awa.tohoku.ac.jp/geoscience2013/>.
- Worman, S.L., Pratson, L.F., Karson, J.A., & Klein, E.M. (2016). Global rate and distribution of H₂ gas produced by serpentinization within oceanic lithosphere. *Geophysical Research Letters*, 43, 6435—6443. <http://doi.org/10.1002/2016GL069066>.
- Zarifi, Z., & Havskov J. (2003). Characteristics of dense nests of deep and intermediate-depth seismicity. *Advances in Geophysics*, 46,

- 237—276. 10.1016/S0065-2687(03)46004-4. *mistry*, 122(22), 12022—12028. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b04125>.
- Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>.
- Zhang, S., Lin, J., Wang, Y., Yang, G-Ch., Bergara, A., & Ma, Y. (2018). Nonmetallic FeH₆ under High Pressure. *Journal of Physical Chemistry*, 122(22), 12022—12028. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b04125>.
- Zhou, X., Du, J., Chen, Z., Cheng, J., Tang, Yi., Yang, L., Xie, C., Cui, Y., Liu, L., Yi, L., Yang, P., & Li, Y. (2010). Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake, southwestern China. *Geochemical Transactions*, 11, 5. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-11-5>.

Про геологічний водень

В.М. Шестопапов, 2020

Науково-інженерний центр радіогідрогеоecологічних
полігонних досліджень НАН України,

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

Утворення геологічного (абіогенного) водню у надрах пов'язують з двома групами гіпотез: формуванням вторинного водню в земній корі і верхній мантії у результаті його виділення з води і деяких мінералів, а також виходу первинного водню з ядра і нижньої мантії, накопиченого у надрах під час акреції планети. У зв'язку з відсутністю прямого доступу до значних глибин Землі доведення правомірності існування первинного водню у глибоких надрах є дуже складною задачею. Непрямими підтвердженнями єдності процесів у геосферах є уявлення про Землю як єдину відкриту систему, що сама розвивається, з виділенням теплової енергії у всіх її геосферах, включаючи ядро. В цій системі існує кризьгеосферне тепломасоперенесення, яке добре узгоджується з уявленнями щодо плюмтектоніки. Додатковим підтвердженням генерації теплової енергії на великих глибинах можуть бути експерименти з геонейтріно, які розвиваються, і виявлення дегазації тритію з жерл деяких вулканів і в глибинних шарах вулканічних озер. Свідченням періодичного потужного виходу глибинного водню з надр є результати досліджень В.Л. Сивороткіна, А. Джилата і А. Вола, А.Ю. Ретеюма та інших. А результати досліджень стану і змін мінерального середовища, а також умов утворення глибинного розташування багатьох відомих нафтогазових і рудних корисних копалин, алмазів свідчать про вирішальне значення виключно відновлюваних флюїдів у їх формуванні. Знахідки самородних металів і зокрема алюмінію у вміщуючих породах є прямим свідченням відновлюваного (суттєво водневого) середовища у період їх утворення. Перші термодинамічні розрахунки підтвердили можливість впливу первинного водню на олівін з наступним утворенням води і серпентину. Спроби визначення загального водневого потенціалу у нафтогазовидобувних басейнах на прикладі вуглеводневих ресурсів Дніпровсько-Донецької Западниці, з одного боку, свідчать про значний ресурсний потенціал водню, а з іншого, у зв'язку із великим резервом нерозвіданих запасів вуглеводнів визначають доцільність сумісних пошукових робіт на вуглеводні і водень. У зв'язку з відсутністю повного доведення гіпотези щодо первинного водню і невизначеності особливостей його можливої дегазації дослідження з пошуків родовищ водню слід проводити у зонах розломів, які можуть забезпечувати висхідний транспорт значних об'ємів водню у відповідності з будь якою групою згаданих вище гіпотез. Це повинні бути потужні глибинні розломи, до яких тяжіють відповідні ємності для проміжного накопичення водню, що перекриваються слабо проникними пластами, спроможними сповільнити висхідну дегазацію водню.

Ключеві слова: геологічний вторинний і первинний водень, тепловий потік, геореактор, дегазація тритію, глибинні розломи, самородні метали, родовища водню.