

**EARTH AS PRIMORDIALLY HYDROGEN-RICH PLANET: HYPOTHESIS AND REALITY****A.V. Pospeev**  

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

**ABSTRACT.** The article is focused on the role of natural hydrogen in the Earth geodynamics and energy potential. With a proper consideration of the physical parameters of the Earth's core and mantle, we discuss the aspects of the Hydridic Earth (or Primordially Hydrogen-Rich Planet) theory, which is currently used as a fundamental hypothesis in modern projects aimed at hydrogen energetics.

A probability of finding natural hydrogen deposits in sedimentary traps is estimated. It is shown that the volume of deep degassing of hydrogen can be calculated from various cosmological, petrophysical and geochemical data, and an average volume is two orders of magnitude less than the amount predicted by the Hydridic Earth hypothesis. This hypothesis gives grounds to conclude that the major part of Earth's mantle is a metal sphere; however, this conclusion is not supported by the geological and geophysical data.

**KEYWORDS:** natural hydrogen; magnetic separation; hydrides of metals; metal sphere; fluid flow; conductivity

**FUNDING:** The study was carried out as part of the mega-grant titled Orogenesis: Formation and Growth of Continents and Supercontinents. The summary of materials includes the data obtained with a partial use of equipment at the Geodynamics and Geochronology Center for Collective Use, Institute of the Earth's Crust SB RAS.

**SHORT COMMUNICATION**

Received: November 24, 2020

Revised: June 7, 2021

Accepted: June 14, 2021

**Correspondence:** Alexandr V. Pospeev, [avp@crust.irk.ru](mailto:avp@crust.irk.ru)

**FOR CITATION:** Pospeev A.V., 2021. Earth as primordially hydrogen-rich planet: hypothesis and reality. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 645–651. doi:10.5800/GT-2021-12-3-0543

## ИЗНАЧАЛЬНО ГИДРИДНАЯ ЗЕМЛЯ: ГИПОТЕЗА И РЕАЛЬНОСТЬ

А.В. Поспеев

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Рассмотрена роль природного водорода в геодинамике и энергетике Земли. Поскольку в современных проектах развития водородной энергетики базовой является гипотеза об изначально гидридной Земле, рассмотрены ее аспекты, а также физические параметры мантии и ядра.

Оценена вероятность нахождения месторождений природного водорода в ловушках осадочного чехла. Показано, что объемы глубинной дегазации водорода, оцениваемые по разнообразным космогоническим, петрофизическим, геохимическим данным, в среднем на два порядка меньше объемов, прогнозируемых гипотезой об изначально гидридной Земле. Следующие из нее выводы о наличии металлосферы не подтверждаются ни геологическими, ни геофизическими данными.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** природный водород; гидриды; магнитная сепарация; металлосфера; флюидный поток; проводимость

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена в рамках реализации мегагранта «Орогенез: образование и рост континентов и суперконтинентов». При обобщении материалов в работе использовались данные, полученные с частичным применением оборудования ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время растет количество сторонников экологически чистых источников энергии, в том числе «водородной энергетики» [Radchenko et al., 2014]. В числе новых направлений в получении водорода, в частности, рассматривается способ использования вещества мантии или естественных залежей природного водорода [Kudrin et al., 2006]. В этой связи возрождается популярность гипотезы В.Н. Ларина об «изначально» гидридной Земле (ИГЗ) [Larin, 2005].

В основе гипотезы ИГЗ лежит предположение о том, что в процессе планетообразования за счет процесса магнитной сепарации вещества внутренняя часть планетной системы оказалась переобогащена элементами с высоким потенциалом ионизации, прежде всего водородом [Hoyle, Wickramasighe, 1968]. В процессе аккреции Земли за счет высокой растворимости водорода в железе подавляющая часть водорода вошла в состав ядра, так что внутреннее ядро оказалось сформированным из гидрида железа, а внешнее – из железо-никелевого расплава с огромным (многие проценты) количеством растворенного водорода. За счет его высвобождения формируется интенсивный мантийный водородный флюидопоток Земли, обеспечивающий планетарные геодинамические процессы. При этом диффундирующие водородные потоки в значительной степени изменяют энергетический баланс Земли как за счет непосредственного переноса тепловой энергии, так и в силу химического взаимодействия водорода с изначально силикатным веществом мантии. Предполагается, что масштабная водородная дегазация имеет во времени пульсирующий характер. В периоды ее активизации происходит расширение верхних оболочек Земли, вызывая процессы спрединга, при затухании

флюидопотока поверхность Земли сжимается, вызывая горообразование [Larin, 2005].

### 2. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Автор не ставил себе целью детальный анализ космогонических аспектов гипотезы ИГЗ. Следует только отметить, что лежащая в ее основе гипотеза магнитной сепарации вещества в процессе планетообразования имела некоторую популярность в середине прошлого века, объясняя таким образом перенос углового момента вращающегося протопланетного диска от центра к периферии. Предполагалось, что на первом этапе вещество исходной газовой-пылевой туманности было стянуто в ее центр, где образовалась центральная звезда – Протосолнце, напряженность магнитного поля которого в миллионы раз превышала напряженность поля современного Солнца. Его ротационная неустойчивость привела к обратному истечению вещества из центра на периферию. При движении вдоль спиральных изолиний магнитного поля, за счет так называемого «пинч-эффекта», вещество образовало протопланетные сгустки, а затем сами планеты и их спутники [Hoyle, Wickramasighe, 1968].

Однако наблюдательные данные последних двух десятилетий позволяют считать, что образование большинства планетных систем происходит из остатков вещества исходной газовой-пылевой туманности после формирования центральной звезды. При этом большая часть водорода и других легких газов оказалась не во внутренней, а во внешней части Солнечной системы [Pechernikova, Vityazev, 2012].

Вытекающая из практически неподтвержденных космогонических допущений догма об огромном количестве водорода в ядре Земли является предпосылкой

для дальнейших геологических построений. В первую очередь постулируется огромный внутренний водородный поток, вносящий существенный вклад в геодинамику Земли. Объем водородной дегазации, согласно гипотезе ИГЗ, можно оценить следующим образом. Если первоначально в момент образования планеты в составе ядра было количество водорода с содержанием во многие весовые проценты, а за 4.5 млрд лет его количество упало вдвое, то через недра планеты диффундировал поток водорода со скоростью  $\sim 10^{13}$  кг/год.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

При расчете реального баланса масс водорода примем, что он израсходовался на формирование поверхностной земной гидросферы, воды в земной коре и мантии, углеводородов, а также поступал в атмосферу, диссипируя далее в околоземное космическое пространство. Согласно современным данным, масса гидросферы Земли составляет  $\sim 1.4 \cdot 10^{21}$  кг [Mikhailov, Dobrolyubov, 2017]. В осадочном слое земной коры и в ее кристаллической части содержание воды оценивается в  $7.3 \cdot 10^{20}$  кг [Zverev, 2007]. В мантии Земли, по оценкам [Ohtani, 2005], содержится масса воды, равная примерно двум мировым океанам. Таким образом, суммарная масса воды выше ядра составляет около  $4 \cdot 10^{21}$  кг, а масса содержащегося в ней водорода –  $5 \cdot 10^{20}$  кг. Отсюда скорость водородного потока составит  $10^{11}$  кг/год, т.е. на два порядка меньше, чем следует из гипотезы ИГЗ. Что касается водорода, не израсходованного на формирование воды и углеводородов, то его поток на поверхности Земли совсем мизерный –  $4 \cdot 10^8$  кг/год [Gordienko, 2019].

Для ответа на вопрос «где же водород?» в гипотезе ИГЗ вводится новая «подпорка». В силу предполагаемого огромного стартового содержания водорода в ядре Земли, в течение всей геологической жизни Земли должна была происходить так называемая «продувка» исходной силикатной мантии водородом. За 4.5 млрд лет с момента возникновения системы ядро – мантия, согласно модели ИГЗ, исходно силикатное вещество было металлизировано в диапазоне глубин 400–2900 км суммарным объемом  $\sim 5.6 \cdot 10^{20}$  м<sup>3</sup>. Исходя из средней плотности силикатной мантии 5000 кг/м<sup>3</sup>, масса исходной мантии составит  $\sim 8 \cdot 10^{24}$  кг. При среднем содержании кислорода в пиролитовой мантии около 45 % его масса составит  $\sim 3.6 \cdot 10^{24}$  кг, а масса необходимого для его восстановления водорода (1/8) –  $\sim 4.5 \cdot 10^{23}$  кг. Если учесть, что масса ядра составляет  $1.85 \cdot 10^{24}$  кг [Litsov, Shatsky, 2016], то массовая доля водорода в ядре, необходимая только для металлизации мантии, составит около 24 %. Понятно, что подобный объем является неправдоподобно большим.

Гипотеза о восстановлении окислов до металлов в термодинамических условиях мантии не доказана никакими лабораторными исследованиями. Что касается комнатных условий, то восстановление до металлов возможно лишь для окислов элементов 6-й группы – хрома, молибдена и вольфрама, суммарное содержание

которых в мантийном веществе составляет десятки – тысячные доли процентов [Ringwood, 1981]. Но и эти металлы даже в микроскопическом содержании в мантийных ксенолитах не встречаются.

Второй немаловажный вопрос, следующий из предположения о существовании металлосферы, – механизм «обезвоживания» металлизированной силикатной мантии. По современным оценкам породы мантии содержат незначительное количество воды, по всей видимости, до подошвы астеносферы – не более нескольких десятых долей процента [Dobretsov, 1981]. В более глубоких частях мантии ее может быть больше – до первых процентов [McDonough, Sun, 1995]. Если учесть, что за все время жизни Земли из-за диссипации воды в космос было потеряно не более 0.5 % от ее первоначального объема [Alpatiev, 1969], то непонятной остается «судьба» 98 % массы воды, которая должна была возникнуть в недрах Земли. Разумного объяснения того, где она находится и как ее скопления отражаются в наблюдаемой скоростной структуре мантии, предложить практически невозможно.

Гипотеза о наличии металлосферы входит в очевидное противоречие с данными глубинных геолого-геофизических исследований. Высказанная первоначально А.Е. Рингвудом [Ringwood, 1981] гипотеза о пиролитовом составе мантии была основана на анализе составов выплавов из пород ультрабазитового состава при различных термодинамических и флюидных условиях и интерпретации наблюдаемого распределения скоростей сейсмических волн. К настоящему времени алюмосиликатный состав мантии доказан до подошвы астеносферы, причем об этом свидетельствует огромное количество работ в области глубинной геофизики и петрофизики при высоких давлениях и температурах [Pushcharovsky D.Yu., Pushcharovsky Yu.M., 1998; Dobretsov, 1981].

Наиболее серьезные противоречия в представлениях о наличии металлосферы возникают при рассмотрении глубинных электромагнитных данных. Представление о поведении подастеносферной части мантии можно получить путем анализа кривой глобального магнитовариационного зондирования (МВЗ) [Fainberg et al., 1977]. Результат ее интерпретации показывает, что удельное сопротивление мантии на глубине 400 км составляет около 10 Ом·м, понижаясь до 1 Ом·м на глубине 900 км и до 0.1 Ом·м на подошве мантии (рис. 1). Такое распределение удельного сопротивления согласуется с результатами лабораторных экспериментов с породами пиролитового состава, приведенными в работе [Shankland et al., 1993].

Проводимость интерметаллидов и их силицидов при РТ-условиях мантии приближается к проводимости металлов. В частности, для чистого кремния при  $T=1000$  °С удельное сопротивление оценено в  $\sim 1.7 \cdot 10^{-5}$  Ом·м [Regel, Glazov, 1980]. По всей видимости, близкий уровень удельного сопротивления имеют при данной температуре и силициды магния и железа. Тогда суммарная проводимость металлосферы при отмеченном выше

удельном сопротивлении составит более  $10^{11}$  См. Разница между наблюдаемой проводимостью мантии и проводимостью предполагаемой металлосферы составляет 4–6 порядков.

В качестве первоочередного полигона поиска природного водорода сторонниками гипотезы ИГЗ предлагается Байкальская рифтовая система (БРС). При этом постулируется, что астеносфера в БРС является холодной и сложена интерметаллидами, так же как и слой «аномальной» мантии. Более того, предполагается, что интерметаллиды формируют некие «клинья», кровля которых может находиться на глубине первых километров от дневной поверхности [Larin, 2005].

Однако подобная геологическая модель находится в очевидном противоречии с имеющимися геолого-геофизическими данными по региону. Региональный тепловой поток БРС по сравнению с Сибирской платформой и Забайкальской областью умеренного горообразования является повышенным, причем этот вывод делается на основании не только анализа геотермических наблюдений [Golubev, 2007], но и оценок РТ-условий существования глубинных ксенолитов из кайнозойских базальтов [Ashchepkov, 1991], а также результатов расчетов глубинности выплавки по минеральным

ассоциациям базальтов [Rasskazov, 1993]. При таких параметрах глубинного геотермического поля частичное плавление начинается уже на глубине 80–90 км, что подтверждается данными магнитотеллурического зондирования (МТЗ) [Pospeev, 2012] и согласуется с петрологическими оценками [Demonterova et al., 2007]. Продольное сопротивление астеносферы в БРС составляет единицы Ом·м, что на много порядков больше удельного сопротивления интерметаллидов. На отсутствие интерметаллидов в астеносфере БРС явно указывают и захваченные в процессе интрузивной деятельности ксенолиты, имеющие силикатный состав, близкий к «пиролиту» Рингвуда [Rasskazov, 1993].

Еще менее вероятно наличие интерметаллидов в слое «аномальной» мантии, так как этот интервал разреза является относительно высокоомным. Это дает основание рассматривать природу этого геофизического объекта в рамках твердофазовых силикатных моделей ультраосновного состава [Pospeev, 2012].

Что касается геологической природы аномальных проводников, расположенных на глубинах в первые километры в рудных областях, то она до сих пор является предметом научных дискуссий. Однако считать, что все локализованные проводящие неоднородности

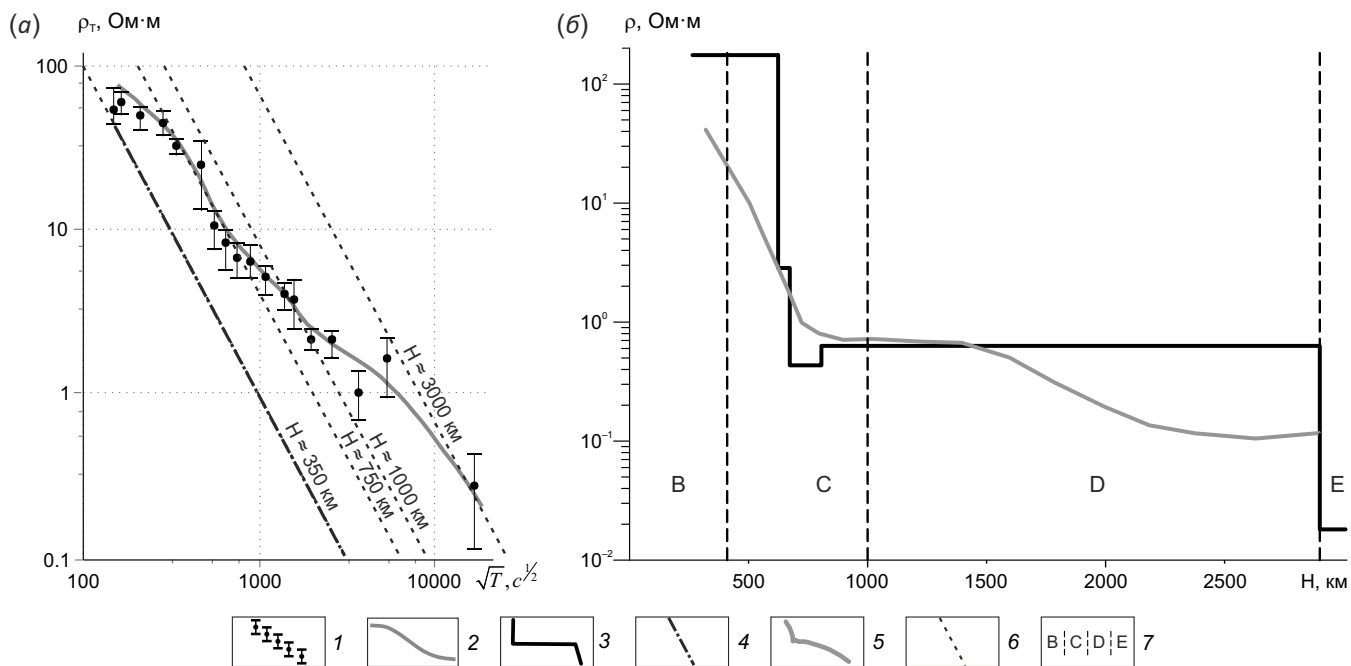


Рис. 1. Геоэлектрические данные.

(а) – кривая глобального МВЗ (с использованием данных [Fainberg et al., 1977]), (б) – геоэлектрический разрез. 1 – средние значения  $\rho_T$  и их среднеквадратические отклонения; 2 – амплитудная кривая, согласованная с фазовой согласно интегральной формуле [Van'yan, Butkovskaya, 1980]; 3 – распределение УЭС по данным ее 1D-инверсии; 4 – предполагаемая амплитудная кривая при положении кровли металлосферы на глубине 350 км и УЭС, равном  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом·м; 5 – распределение УЭС в мантии по данным [Kovtun, 2009]; 6 – линии равных глубин; 7 – глобальные оболочки Земли [Dziewonski, Anderson, 1981].

Fig. 1. Geoelectrical data.

(а) – global magnetovariational sounding curve (using the data from [Fainberg et al., 1977]), (б) – geoelectrical section. 1 – average  $\rho_T$  values and their standard deviations; 2 – amplitude curve, consistent with the phase in the integral formula [Van'yan, Butkovskaya, 1980]; 3 – distribution of electrical resistivity according to 1D-inversion data; 4 – assumed amplitude curve in case of the metal sphere's roof located at a depth of 350 km and the resistivity of  $1 \cdot 10^{-4}$  Ohm·m; 5 – distribution of electrical resistivity in the mantle according to the data from [Kovtun, 2009]; 6 – lines of equal depths; 7 – global shells of the Earth [Dziewonski, Anderson, 1981].

сложены интерметаллидами, нет никаких научных оснований. В природе распространены горные породы, содержащие минералы с электронной проводимостью, которые могут образовывать достаточно масштабные скопления с весьма высокой проводимостью. В первую очередь это графитизированные породы, зоны прожилковой сульфидной (прежде всего пирит-пирротиновой) минерализации, скопления магнетита. В силу естественной эродированности кристаллических толщ в горно-складчатых областях эти проводящие объекты часто фиксируются геологическими и геофизическими работами, например в Бодайбинском синклинии. Они вскрыты сверхглубоким бурением Кольской и Мурунтауской скважинами [Popov, Kremetsky, 1999].

Известным фактором, побуждающим исследователей рассматривать наличие легких элементов в составе ядра, является дефицит скорости и плотности, вытекающий из геофизических данных по отношению к упругим параметрам железоникелевого сплава при соответствующих РТ-условиях. Использование в качестве модели состава углистых хондритов дает основание оценить количество водорода в составе ядра на уровне 600 ppm [Litasov, Shatsky, 2016]. Эксперименты по изучению фазовых соотношений в системе Fe-H показали, что максимальная растворимость водорода в железоникелевом сплаве в РТ-условиях внешнего ядра составляет 0.4 % [Okuchi, 1997]. Кроме того, водород сильно занижает упругие параметры железоникелевого субстрата, так что для объяснения наблюдаемого дефицита скорости и плотности в ядре требуется не более 1 мас. %, а с учетом реального содержания других легких элементов (Si, C, S) [Litasov, Shatsky, 2016] эта доля еще меньше.

#### 4. ПРИРОДНЫЙ ВОДОРОД КАК ПОЛЕЗНОЕ ИСКОПАЕМОЕ

Проявления природного водорода на поверхности Земли известны наблюдателям достаточно давно. В наиболее полном по данной теме обзоре, выполненном В. Згонником [Zgonnik, 2020], рассмотрены и классифицированы многочисленные проявления природного водорода. Показана значительная роль вторичных эндогенных (серпентинизация ультраосновных пород, радиолиз воды) и биологических процессов в формировании потоков природного водорода.

Рассматривая вопрос о возможности существования залежей природного водорода, следует отметить, что их строение должно подчиняться тем же закономерностям, что и строение «обычных» месторождений углеводородов. Для формирования последних необходимо наличие нескольких геологических факторов: пластов-коллекторов, имеющих полезный объем трещинно-порового пространства, покрышек, характеризующихся пониженной флюидопроницаемостью, и зон генерации флюида. Поскольку гипотезой ИГЗ предполагается существование мощного глубинного водородного потока, можно рассматривать природный

водород в качестве «конкурента» углеводородам. Тогда при абсолютно непроницаемых покрышках флюидный состав залежей будет характеризовать соотношение флюидных потоков. Однако в месторождениях нефти и газа объем неуглеводородных флюидов сравнительно невелик, содержание таких газов уменьшается в ряду  $N_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ , He. Доля свободного водорода при этом редко превышает первые проценты. Определенная и, возможно, существенная часть водорода в этом случае имеет биогенное происхождение, в частности при бурении на полимерглинистых растворах [Cherepanov et al., 2014]. Неглубинное происхождение может иметь водород и в приповерхностных отложениях в силу протекания процессов маслянокислого брожения при гниении органических остатков [Netrusov, Kotova, 2012].

Показательным является соотношение объемов добытых углеводородов и природного водорода. Если накопленная добыча нефти к настоящему времени составляет около 200 млрд т, а газа – 150 трлн  $m^3$  (с учетом состояния на 1908 г. и добычи вплоть до 2020 г. [Vysotsky, Dmitrievsky, 2008]), то объем добываемого свободного водорода позволяет обеспечить работу единственного в мире электрогенератора мощностью 20 кВт! Более того, подавляющий объем водорода для нужд водородной энергетики производится из водородосодержащих веществ путем применения относительно дорогостоящих технологий [Ione, 2003].

Отсутствие открытых к настоящему времени крупных месторождений природного водорода в осадочных отложениях (подобных месторождениям нефти и газа) позволяет сделать вывод, что глубинный поток свободного водорода существенно (на много порядков) меньше потока генерируемых в осадках (или поступающих из мантии) углеводородов. Кроме того, качество покрышек, достаточных для «запечатывания» углеводородных залежей, может быть недостаточным для природного водорода, имеющего максимальную диффундирующую способность.

Что касается Байкальского рифта, то непосредственно в его пределах месторождения нефти и газа неизвестны, хотя зафиксированы естественные нефте- и газопроявления, а также огромные запасы метана в форме газогидратов в Байкале [Golubev, 2007]. В.П. Исаевым [Isaev, 2016] показано, что в свободных газах Баргузинской, Селенгинской и Тункинской впадин содержание свободного водорода составляет 0.002–0.140 об. %, т.е. масштабная водородная дегазация в Байкальском рифте отсутствует.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космогоническое обоснование гипотезы «изначально гидридной Земли» не содержит научных аргументов о существовании эффективного механизма обогащения водородом внутренней части протопланетной Солнечной системы. В силу этого содержание водорода в ядре Земли в гипотезе ИГЗ переоценено на 1.5–2.0 порядка.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что водород не является основным элементом, ответственным за «облегчение» земного ядра.

Объем водородной дегазации, рассчитанной исходя их накопленного содержания воды в геосферах Земли, примерно стократно меньше прогнозного потока, вытекающего из гипотезы ИГЗ.

Изучение баланса флюидов показывает, что наблюдаемые потоки глубинного водорода на 1.5–2.0 порядка меньше потока, необходимого для металлизации изначально силикатной мантии.

Вывод о наличии «металлосферы» Земли не подтверждается данными электромагнитных исследований, а также результатами анализа глубинных магматических ассоциаций. Это относится как к мантии в целом, так и к глубинной геологической структуре Байкальской рифтовой зоны.

В связи с невысоким в среднем флюидопотоком глубинного водорода вероятность обнаружения его крупных экономически значимых залежей в структурах осадочного чехла крайне мала.

## 6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Alpatiev A.M., 1969. Water Cycles in Nature and Their Transformations. *Gidrometeoizdat*, Leningrad, 323 p. (in Russian) [Алпатьев А.М. Влагообороты в природе и их преобразования. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 323 с.].

Ashchepkov I.V., 1991. Deep Xenoliths of the Baikal Rift. *Nauka*, Novosibirsk, 158 p. [Ащепков И.В. Глубинные ксенолиты Байкальского рифта. Новосибирск: Наука, 1991. 158 с.].

Cherepanov V.V., Menshikov S.N., Varyagov S.A., Nazina T.M., Bondarev V.L., Gudzenko V.T., Mirotvorskyy M.Yu., 2014. Origin of Hydrogen in Annular Space of Wells in the Bovanenkovskoye Oil-Gas-Condensate Field. *Oilfield Engineering* 12, 43–48 (in Russian) [Черепанов В.В., Меньшиков С.Н., Варягов С.А., Назина Т.М., Бондарев В.Л., Гудзенко В.Т., Миrotворский М.Ю. Происхождение водорода в межколонном пространстве скважин Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения // Нефтепромысловое дело. 2014. № 12. С. 43–48].

Demonterova E.I., Ivanov A.V., Rasskazov S.V., Markova M.E., Yasnygina T.A., Malykh Yu.M., 2007. Lithospheric Control on Late Cenozoic Magmatism at the Boundary of the Tuva-Mongolian Massif, Khubsugul Area, Northern Mongolia. *Petrology* 15 (1), 90–107. <https://doi.org/10.1134/S0869591107010055>.

Dobretsov N.L., 1981. Global Petrological Processes. *Nedra*, Moscow, 236 p. (in Russian) [Добрецов Н.Л. Глобальные петрологические процессы. М.: Недра, 1981. 236 с.].

Dziewonski A.M., Anderson D.L., 1981. Preliminary Reference Earth Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 25 (4), 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).

Fainberg E.B., Fiskina M.V., Rotanova N.M., 1977. Experimental Data on Global Electromagnetic Sounding of the

Earth. In: *Studies of the Space-Time Structure of the Geomagnetic Field*. *Nauka*, Moscow, p. 102–113 (in Russian) [Файнберг Э.Б., Фискина М.В., Ротанова Н.М. Экспериментальные данные по глобальному электромагнитному зондированию Земли // Исследования пространственно-временной структуры геомагнитного поля. М.: Наука, 1977. С. 102–113].

Golubev V.A., 2007. Conductive and Convective Heat Transfer in the Baikal Rift Zone. *GEO*, Novosibirsk, 222 p. (in Russian) [Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Гео, 2007. 222 с.].

Gordienko V.V., 2019. About Degassing of the Earth. *Geophysical Journal* 41 (3), 18–45 (in Russian) [Гордиенко В.В. О дегазации Земли // Геофизический журнал. 2019. Т. 41. № 3. С. 18–45].

Hoyle F, Wickramasighe N.C., 1968. Condensation of the Planets. *Nature* 217, 415–418. <https://doi.org/10.1038/217415a0>.

Ione K.G., 2003. Problems of Industrial Production of Hydrogen in Comparison to Extraction Problems of Natural Hydrogen as Mineral Resource. *Chemistry for Sustainable Development* 11 (6), 907–917 (in Russian) [Ионе К.Г. Проблемы промышленного производства водорода в сопоставлении с проблемами добычи природного водорода как полезного ископаемого // Химия в интересах устойчивого развития. 2003. Т. 11. № 6. С. 907–917].

Isaev V.P., 2016. Prospects for Oil and Gas Potential of Intermontane Depressions in Buryatia. *GEO*, Novosibirsk, 165 p. (in Russian) [Исаев В.П. Перспективы нефтегазности межгорных впадин Бурятии. Новосибирск: Гео, 2016. 165 с.].

Kovtun A.A., 2009. Physical Properties of the Earth According to Deep Geoelectric Surveys. *Issues of Geophysicists* 42, 84–104 (in Russian) [Ковтун А.А. Физические свойства Земли по данным глубинной геоэлектрики // Вопросы геофизики. 2009. Вып. 42. С. 84–104].

Kudrin I.V., Orlyankin V.N., Kudrin K.I., 2006. Method of Searching of Gaseous Hydrogen and Helium Clusters in Earth Interior. Patent for Invention No. 2316028C2 (RU) Dated March 1, 2006. *ROSPATENT*, Moscow (in Russian) [Кудрин И.В., Орлянкин В.Н., Кудрин К.И. Способ поисков в недрах Земли скоплений газообразных гелия и водорода: Патент на изобретение № 2316028C2 (RU) от 01.03.2006. М.: РОСПАТЕНТ, 2006].

Larin V.N., 2005. Our Earth (Origin, Composition, Structure and Development of the Hydridic Earth). *Agar*, Moscow, 242 p. (in Russian) [Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: Агар. 2005. 242 с.].

Litasov K.D., Shatsky A.F., 2016. Composition and Structure of the Earth's Core. *Publishing House of SB RAS*, Novosibirsk, 304 p. (in Russian) [Литасов К.Д., Шацкий А.Ф. Состав и строение ядра Земли. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 304 с.].

McDonough W.F., Sun S.-S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120 (3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).

Mikhailov V.N., Dobrolyubov S.A., 2017. Hydrology. Textbook for Universities. Direct-Media, Moscow, Berlin, 752 p. (in Russian) [Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология: Учебник для вузов. М., Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.].

Netrusov A.I., Kotova I.B., 2012. Microbiology. Academy Publishing Center, Moscow, 384 p. (in Russian) [Нетрусов А.И., Котова И.Б. Микробиология. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 384 с.].

Ohtani E., 2005. Water in the Mantle. Elements 1 (1), 25–30. <https://doi.org/10.2113/gselements.1.1.25>.

Okuchi T., 1997. Hydrogen Partitioning into Molten Iron in High Pressure: Implications for Earth's Core. Science 278 (5344), 1781–1784. <https://doi.org/10.1126/science.278.5344.1781>.

Pechernikova G.V., Vityazev A.V., 2012. Origin and Early Evolution of the Solar System. Earth and the Universe 1, 3–20 (in Russian) [Печерникова Г.В., Витязев А.В. Происхождение и ранняя эволюция Солнечной системы // Земля и Вселенная. 2012. № 1. С. 3–20].

Popov V.S., Kremenetsky A.A., 1999. Deep and Super-deep Research Drilling on Continents. Soros Educational Journal 11, 61–68 (in Russian) [Попов В.С., Кременецкий А.А. Глубокое и сверхглубокое научное бурение на континентах // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 11. С. 61–68].

Pospeev A.V., 2012. The Velocity Structure of the Upper Mantle and Regional Deep Thermodynamics of the Baikal Rift Zone. Geodynamics & Tectonophysics 3 (4), 377–383 (in Russian) [Поспеев А.В. Скоростная структура верхней мантии и региональная глубинная термодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 4. С. 377–383]. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0080>.

Pushcharovsky D.Yu., Pushcharovsky Yu.M., 1998. Composition and Structure of the Earth's Mantle. Soros Educational Journal 11, 111–119 (in Russian) [Пушчаровский Д.Ю., Пушчаровский Ю.М. Состав и строение мантии Земли // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 11. С. 111–119].

Radchenko R.V., Mokrushin A.S., Tyulpa V.V., 2014. Hydrogen in Energy. Textbook. Publishing House of the Ural University, Ekaterinburg, 229 p. (in Russian) [Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. 229 с.].

Rasskazov S.V., 1993. Magmatism of the Baikal Rift System. Nauka, Novosibirsk, 288 p. (in Russian) [Рассказов С.В. Магматизм Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Наука, 1993. 288 с.].

Regel A.R., Glazov V.M., 1980. Physical Properties of Electronic Melts. Nauka, Moscow, 296 p. (in Russian) [Перель А.Р., Глазов В.М. Физические свойства электронных расплавов. М.: Наука, 1980. 296 с.].

Ringwood A.E., 1981. Composition and Petrology of the Earth's Mantle. Nedra, Moscow, 585 p. (in Russian) [Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 585 с.].

Shankland T.J., Peyronneau J., Poarier J.-P., 1993. Electrical Conductivity of the Earth's Lower Mantle. Nature 366, 453–455. <https://doi.org/10.1038/366453a0>.

Van'yan L.L., Butkovskaya A.I., 1980. Magnetotelluric Sounding of Layered Medium. Nedra, Moscow, 228 p. (in Russian) [Ваньян Л.Л., Бутковская А.И. Магнитотеллурические зондирования слоистых сред. М.: Недра, 1980. 228 с.].

Vysotsky V.I., Dmitrievsky A.N., 2008. Global Oil and Gas Resources and Their Development. Russian Chemical Journal 52 (6), 18–24 (in Russian) [Высоцкий В.И., Дмитриевский А.Н. Мировые ресурсы нефти и газа и их освоение // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. № 6. С. 18–24].

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>.

Zverev V.P., 2007. Groundwaters of the Earth's Crust and Geological Processes. Nauchny Mir, 256 p. (in Russian) [Зверев В.П. Подземные воды земной коры и геологические процессы. М.: Научный мир, 2007. 256 с.].