

УДК 661.961.9

ПОИСКИ ПРИРОДНОГО ВОДОРОДА В РОССИИ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЕ СТАРТОВЫЕ РЕШЕНИЯ

© 2025 г. Л.А. Абукова^{1,*}, Ю.А. Волож², Д.С. Филиппова¹, Е.А. Сафарова¹

Представлено академиком РАН М.А. Федонкиным 19.08.2024 г.

Поступило 19.08.2024 г.

После доработки 08.09.2024 г.

Принято к публикации 09.09.2024 г.

К моменту принятия решения (приказ Росстандарта 7 июля 2023 года № 490-ст) о включении водорода в общероссийский классификатор полезных ископаемых в России исследования по геолого-экономическому анализу возможностей промышленного освоения ресурсов водорода не проводилось. Более того, ископаемый водород был изучен крайне слабо. Сложившееся положение требует ускоренной разработки поисковой водородной концепции, построенной на научном обосновании наиболее перспективных региональных направлений работ. В статье авторы излагают своё видение этой проблемы и предлагают её возможные решения. В частности, аргументируется необходимость организации научно-технологических водородных полигонов, в задачи которых будет входить: (i) развитие теоретических представлений о роли водорода в эволюции Земли; (ii) детализация механизмов локализации водорода в геологической среде; (iii) разработка критериев и методов геолого-экономической оценки поисков, разведки и добычи водорода; (iv) проведение геолого-промышленных исследований на наиболее перспективных объектах для разработки и аprobации методики поиска залежей водорода и сопутствующих полезных ископаемых.

Ключевые слова: природный водород, древние платформы, большие глубины, серпентинизация, радиолиз, микробиологические процессы генерации водорода, минерально-энергетические ресурсы земных недр

DOI: 10.31857/S2686739725010063 EDN: GWXNNI

ВВЕДЕНИЕ

Водородная энергетика – ключевое направление современной экономики, построенное на экологических императивах. К настоящему времени достигнуты значительные успехи в производстве и хранении технического водорода. В последнее десятилетие неуклонно нарастает интерес и к природному водороду (H_2), как энергоресурсу, не связанному с эмиссией парниковых газов.

Водород, продуцируемый в земных недрах, исследован крайне слабо. Между тем, “водородный бум” нарастает. Многие страны (Австралия, США, Китай, Испания, Франция, Мали, Оман и др.) и десятки компаний уже ведут работы по поиску природного водорода, чаще всего ориентируясь на ранее случайно обнаруженные выходы этого газа.

В России водород включён в общероссийский классификатор полезных ископаемых (приказ Росстандарта от 07 июля 2023 года № 490-ст). Это решение требует ускоренного научного обоснования выбора наиболее перспективных объектов, в пределах которых целесообразно первоочередное проведение геологических, геофизических, геохимических, гидрогеологических исследований, необходимых для обоснования комплексной методики ведения поисково-разведочных работ на водород.

¹ Институт проблем нефти и газа Российской Академии наук, Москва, Россия

² Геологический институт Российской Академии наук, Москва, Россия

* E-mail: abukova@ipng.ru

Цель настоящей статьи – обоснование предложений по формированию научного базиса концепции поисков природного водорода в России.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные материалы для решения целевой задачи собраны из многочисленных литературных и фондовых источников, отражающих результаты изучения геологического строения земных недр, механизмов генерации и аккумуляции в них водорода.

Для обобщения исходных материалов использованы методы общенаучного характера, а также специальные методические подходы,

ориентированные на анализ геолого-геофизической информации. Так, инструментами библиометрического анализа выявлена динамика публикационной активности по вопросам генерации и аккумуляции природного водорода, показана заинтересованность различных стран, научных центров и ресурсодобывающих компаний в проведении поисковых работ на предмет обнаружения промышленных скоплений H_2 (рис. 1).

Стоит отметить, что количество публикаций, посвящённых природному водороду, увеличивается в последние годы с нарастающей быстрой; многие работы имеют высокий пятилетний уровень цитирования (свыше 1000).

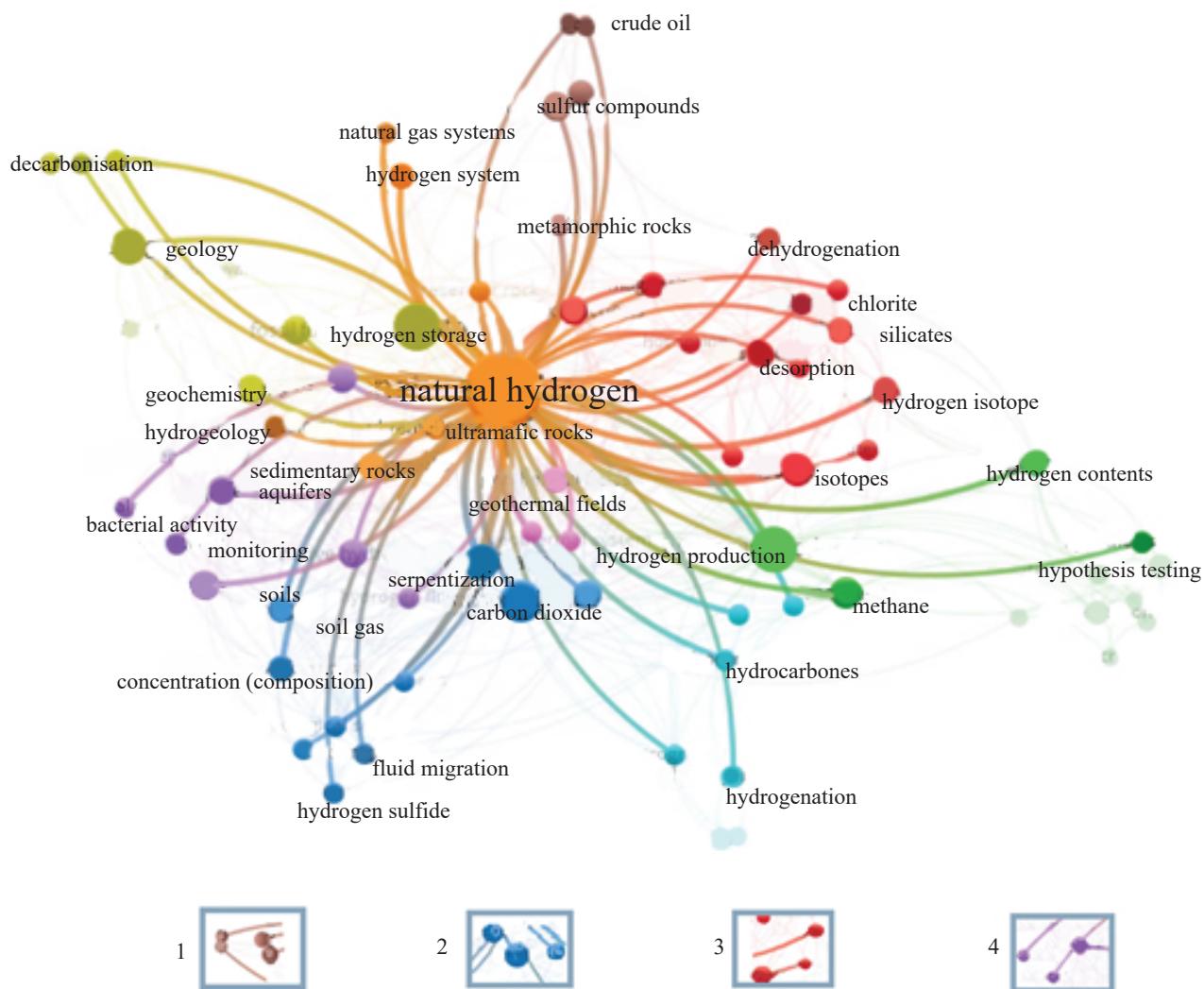


Рис. 1. Тематический ландшафт предметной области "природный водород" (native/natural/geological/white/gold/hydrogen) на основе базы данных Scopus за 20-летний период (программное обеспечение VOSviewer). Условные обозначения: 1 – биогенные источники; 2 – абиогенные источники; 3 – взаимодействие с породами; 4 – микробиологические процессы

Предшествующий уровень исследования

К настоящему времени известны сотни проявлений водородной дегазации, большая часть из них тяготеет к границам литосферных плит, разломным зонам, регионам с повышенной сейсмичностью [4, 17, 20], однако достоверно известно лишь об одной промышленно значимой залежи свободного водорода; её находка в Мали [18] и послужила “точкой отсчёта” истории этого газа как полезного ископаемого. Сейчас мировые ресурсы H_2 оценены в 5 трлн т. Предполагается, что себестоимость добычи природного водорода будет кратно ниже, чем у “зелёного” водорода” [16].

Усиливается тенденция поиска глубокопогруженных водородных скоплений. Так, во Франции на глубине 200 м был обнаружен H_2 низкой концентрации, но по мере углубления объектов опробования концентрация водорода росла до 14% на глубине 1100 м и 20% – на глубине 1250 м [20]. Подобные примеры не единичны. Приведены и веские аргументы в пользу того, что на больших глубинах древних платформ существуют благоприятные условия генерации и аккумуляции водорода [16].

Интересен опыт Австралии, где выдаются государственные лицензии на поиск природного водорода. Здесь поиски H_2 совмещаются с получением технического водорода из угольных пластов с использованием энергии солнечных батарей, ветра и морских приливов. Одновременно решаются вопросы подземного хранения водорода независимо от способа его получения [15].

В российской научной литературе до недавнего времени H_2 в качестве полезного ископаемого упоминался лишь в редких случаях [5, 12, 14]; не отражена такая функция H_2 в государственных программных документах, в том числе Дорожной карте по развитию водородной энергетики в РФ до 2024 года (распоряжение Правительства РФ от 12 октября 2020 года № 2634-р). Отсутствуют методические разработки оценки его запасов и ресурсов, не обоснованы экономические критерии рентабельности, не создана нормативная база проведения поисковых и разведочных работ на водород.

Существует много спорного относительно генезиса и условий локализации природного водорода. Но вместе с тем, благодаря работам научных ряда стран (G. Etiope, I. Moretti, R. Nandi, A. Prinzhofe, L. Truche, V. Zgonnik и др.) и России (Э.М. Галимов, В.Н. Ларин, С.П. Левшунова, В.А. Нивин, В.А. Соколов, М.А. Федонкин, В.П. Якуцени и др.), отдельные вопросы, касающиеся генерации и аккумуляции водорода,

разногласий не вызывают. Так, на сегодняшний день хорошо известно о магматогенных, метаморфогенных, радиогенных и микробиологических источниках водорода в геологической среде [6, 7, 8, 20]. В частности, не вызывает сомнения глобальная геологическая роль серпентинизации и радиолиза воды в генерации водорода [13, 15, 17]. Отмечено отсутствие корреляции между содержанием водорода и метана для газов метаморфического происхождения [8], но выявлено наличие обратной корреляции (рис. 2) для метана и водорода биохимического генезиса [3, 14]. В более полном изложении эти вопросы рассмотрены в работах [4, 14, 20].

Представления о процессах аккумуляции водорода менее определены. Как правило о них судят по поверхностным проявлениям водородной дегазации, свидетельствующим о направлениях (и отчасти масштабах) беспрепятственной водородной дегазации. Но физическая суть дегазационных процессов – не концентрирование, а рассеивание водорода в геологической среде, поэтому внешние проявления водородной дегазации (к примеру, выбеленные круги) не всегда являются надёжными диагностическими критериями локализации природного водорода.

Большой объём исследований проведён по моделированию геохимических, геомеханических процессов, сопровождающих совместное хранение водорода и метана на объектах хранения природных газов (ПХГ). Полученные нами результаты на ряде ПХГ, расположенных в водоносных горизонтах (рис. 3), демонстрируют активность метаногенных архей и бактерий,

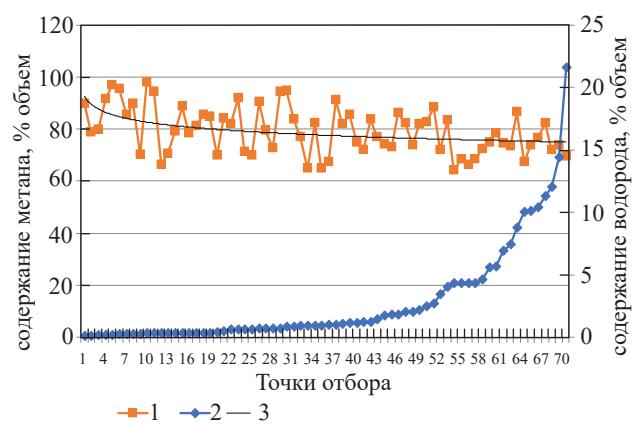


Рис. 2. Характер накопления водорода и метана в водах надсолевого этажа Прикаспийской нефтегазоносной провинции. 1 – содержание метана (% объем); 2 – содержание водорода (% объем); 3 – степенное осреднение содержания метана

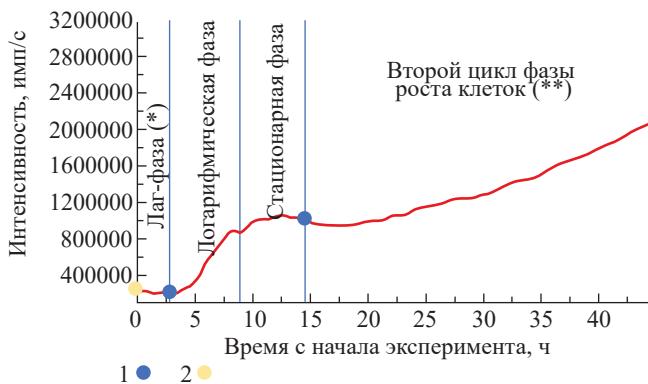


Рис. 3. Результаты секвенирования проб пластовой воды Щелковского ПХГ и рост популяций микробиологической популяции в этих водах при дополнительном питании водородом по экспериментальным данным авторов. 1 – добавление водорода в ходе эксперимента; 2 – отбор проб для определения микробиологического состава; (*) исходный микробиологический состав исследуемых групп микроорганизмов: метанотрофы (*Marinobacter*) – 92% (**): конечный микробиологический состав исследуемых групп микроорганизмов: метанотрофы (*Marinobacter*) – 9%, метаногены (*Methylophaga*) – 8%, сульфатредуцирующие микроорганизмы (*Desulfopila*) – 9%, сероокисляющие (*Thiohalobacter*, *Thioalkalipiraceae*) – 30%

способных использовать водород в качестве источника энергии [9].

Интерес для промышленного освоения ресурсов водорода имеют и работы, направленные на выявление характера взаимодействия этого газа с породами вмещающих их коллекторов. Как частный пример подобных исследований можно отметить обнаружение на основе экспериментальных моделей значимых изменений в ёмкостно-фильтрационных и прочностных свойствах терригенных пород, индуцированных их геохимическим взаимодействием с водородом в случае их увлажнения и отсутствия значимых эффектов при контакте водорода с сухими образцами терригенных пород, причём как при циклической нагрузке, так и при стационарной (рис. 4) [2].

Приведённые выше сведения о раннее выполненных исследованиях, не претендую на полноценный обзор накопленного знания в области природного водорода, демонстрируют лишь различные аспекты изучения взаимодействия водорода с геологической средой. Тем не менее, они дают возможность высказать некоторые суждения о региональных направлениях поиска водорода в России.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ: ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ ПОИСКА ЗОН АККУМУЛЯЦИИ ВОДОРОДА В РОССИИ

Исходя из современного уровня наших знаний о закономерностях распределения выходов природного водорода на поверхность и в приповерхностные слои земной коры, а также с учётом существующих гипотез формирования водорода, возможно сформулировать следующие базовые положение поисковой водородной концепции (табл. 1):

1. Абиогенный синтез водорода поставляется в литосферу наибольший объём водорода. Он реализуется различными путями, но наиболее распространённые – серпентинизация ультраосновных пород и радиолиз воды.

2. Составы газовых смесей из абиогенных генерационных источников не проявляют корреляцию между содержанием водорода и метана; метан присутствует в низких, подчас следовых концентрациях, что исключает возможность формирования их промышленно значимых скоплений. Водород абиогенного происхождения в силу высокой летучести может быть встречен в широком интервале глубин.

3. Составы газовых смесей из биогенных генерационных источников характеризуются обратной корреляционной зависимостью между водородом и метаном (антагонизм Исаева), содержание водорода существенно ниже содержания метана. Водород биогенного происхождения концентрируется в осадочном чехле преимущественно под соленосными и долеритовыми покрышками.

4. Механизмы аккумуляции водорода принципиально различны для нефтегазоносных и нефтегазоперспективных территорий континентов, с одной стороны, и щитов и орогенных (складчатых и блоковых) сооружений подвижного пояса, с другой (см. табл. 1). В пределах нефтегазоносных территорий ключевую роль играют доминантный и региональные флюидоупоры. Особо велика роль доминантных флюидоупоров (ДФ), разделяющих разрезы осадочного чехла нефтегазоносных провинций плитных структур молодых и древних платформ на два этажа с разными типами водонапорных режимов (верхний со свободным и нижний – с (квази) стагнационным). В литологическом отношении в качестве ДФ чаще всего выступают соленосные и/или долеритовые гигантские толщи. Флюидоизоляционные свойства ДФ могут быть усилены присутствием в верхних частях разреза

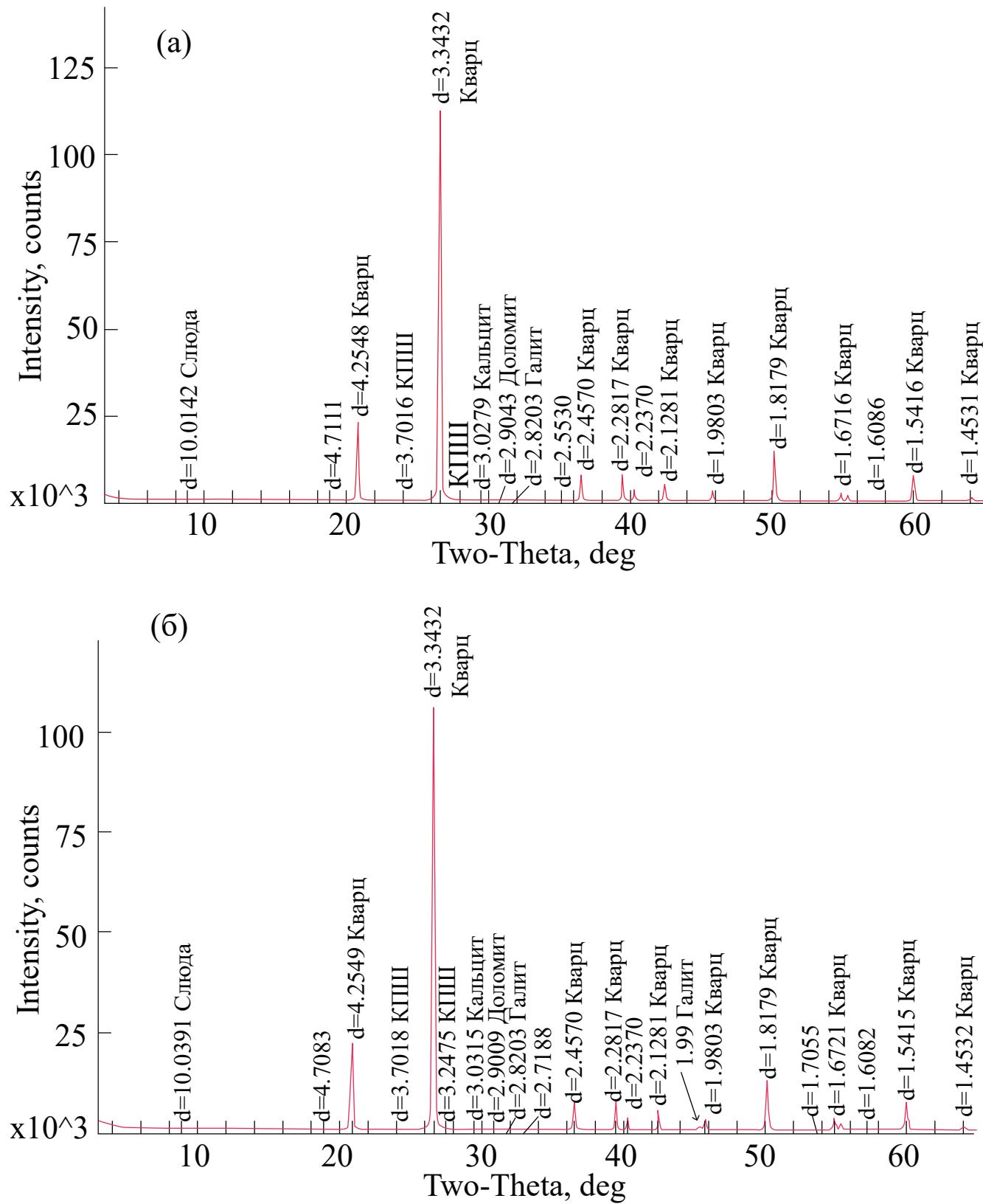


Рис. 4. Сравнительная оценка рентгеновской дифракционной картины образца песчаника до (а) и после (б) выдержки в водороде (минеральный состав песчаника: кварц – 94%, слюда – 2%, доломит – 1.1%, калиевый полевой шпат – 2%, кальцит – 0.6%, галлит – 0.3%)

Таблица 1. Прогнозные объекты и направления научных исследований по обоснованию критерии поисков природного водорода как полезного ископаемого

Различия регионов по наличию (отсутствию) в земной коре региональных и доминантных флюидоупоров		Регионы, где отсутствуют региональные и доминантные флюидоупоры		Провинции* нефтегазоносные и перспективные (тектоно-седиментационные провинции) плитных структур древних и молодых платформ расположенные во внутренних частях плит		Бассейны* нефтегазоносные и перспективные (садочно-породные бассейны)	
Краткое описание объектов	Краткое описание объектов	Краткое описание объектов	Краткое описание объектов	древних платформ	молодых платформ	на границах со складчатыми сооружениями	на сочленении древних и молодых платформ
Регионы	Регионы	Регионы	Регионы	Лено-Тунузская, Сибирско-Уральская НГП	Западно-Сибирская, Лено-Вилойская НГП	Прикаспийская, Баренцево-Карская НГП	Восточно-Арктическая, перспективная НГПП
Примеры территории*	Алданский, Балтийский, Вулкано-плутонический	Курило-Камчатская, Вулкано-плутонический	Алтас-Саянское складчатое сооружение	Тимано-Печорская, Лено-Вилойская НГП	Охотоморский НГБ	Черноморский НГБ	Байкальский НГП
Генерационные источники Н ₂							
а) серпентинизация	*	*	*	?	?	*	?
б) радиолиз	*	*	*	?	?	*	?
в) микробиологические процессы	?	?	?	*	?	?	*

Таблица 1. Окончание

Преимущественное направление транзита:								
а) вертикальное	*	*	*	?	?	*	?	?
б) латеральное	-	-	-			-		
Прогнозируемые особенности аккумуляции:								
а) скопления H_2 очагового типа, мелкие по размерам, часто встречающиеся	*	*	*	?	?	-	?	?
б) скопления H_2 пластового типа, крупные, редко встречающиеся	-	-	-	?	?	*	?	?
Наиболее перспективные региональные объекты	Балтийский щит							
Первоочередные объекты для размещения научно-технологических полигонов	Онежская мульда							
							Прикаспийская НГП	
							Астраханский свод	

Примечание. – провинции и бассейны выделены с учётом геодинамического режима развития из земной коры: провинции – платформенного, бассейны – глыбово-орогенным и складчато-орогенным. – выбор поисковых региональных объектов выполнен с использованием следующих материалов:

(1) структурная карта платформенных территорий СССР масштаба 1:5 000 000 (1982) под ред. В.В. Семеновича, Л.И. Ровнина, Н.В. Неволина и др.

(2) геодинамическая карта России масштаба 1:10 000 000 (1995) под ред. Н.В. Межеловского, А.И. Бурдэ.

(3) схема мощностей неизученной глубокой части разреза осадочного чехла нефтегазоносных провинций России и смежных стран (Волож Ю.А., Федонкин М.А., Талкачев В.М. О новых подходах поисковых работ в традиционных провинциях добычи // Нефтегазовая вертикаль. 2020. № 7. С. 74).

Использованы следующие обозначения при обозначении значимости характеристики: * – значимое проявление; ? – отсутствие проявления; ? – характер проявления не выявлен.

НГП – нефтегазоносная провинция; НГБ – нефтегазоперспективная провинция; НГП – нефтегазоперспективный бассейн; НГПБ – нефтегазоперспективный бассейн.

газогидратных пластов, а также развитием ниже соляных (или долеритовых) покровов гидродинамически экранированных углеводородных систем автоклавного типа [1]. Таким образом, наличие ДФ, размещение зон накопления водорода в нижнем геофлюидодинамическом этаже и пространственная сближенность генерационных источников H_2 и зон накопления водорода в совокупности обеспечивают на больших глубинах нефтегазоносных провинций/бассейнов самые благоприятные условия для формирования крупных залежей водорода.

В пределах щитов древних платформ и плит молодых и древних платформ преобладает вертикальная миграция водорода, что многократно зафиксировано в виде водородных (метан-водородных) эманаций. Тем не менее, стабильность дебитов и геохимический состав газовых смесей являются важнейшими объектами изучения.

Подчеркнём важное: путь от ориентации поисков водорода по отдельным прямым и косвенным признакам до создания полноценной методики прогноза промышленно значимых залежей водорода лежит через проведение большого объёма фундаментальных исследований и опытных работ. Это, в свою очередь, актуализирует задачу организации комплексных научно-технологических полигонов для детализации научно-методических основ прогнозирования H_2 и отработки технологий его поисков, разведки и разработки. Вопрос о необходимости создания научно-технологических полигонов для изучения водорода как полезного ископаемого ранее был поставлен в работе одного из авторов этой статьи; в последней сформулированы и основные задачи, которые целесообразно изучать на базе полигонов [14]. С некоторыми дополнениями они сводятся к следующему: (1) разработка терминологического глоссария водородной геологии; (2) создание классификации планетарных газов по содержанию водорода; (3) формирования программы геофизических, геохимических и гидрогеологических исследований испытательных скважин; (4) переход от признаков (предпосылок) к критериям перспективности на водород для различных геолого-тектонических обстановок; (5) обоснование надёжных методов оконтуривания скоплений природного водорода, оценки запасов (ресурсов) водорода; (6) апробация различных критерии ранжирования залежей H_2 по величине их запасов и глубине размещения; (7) исследование возможностей и целесообразности учета при оценке ресурсов объёмов сорбированного и водорастворённого водорода; (8) оценка значимости отличий механизмов аккумуляции

водорода в условиях закрытых и открытых гидродинамических систем.

В геолого-промышленном отношении важно: (1) уточнение условий проявления водородного охрупчивания цемента пород резервуаров и геомеханических последствий активной водородной дегазации; анализ возможностей ингибиционных нежелательных следствий этих процессов; (2) мониторинг устойчивости дебитов естественных эманаций водорода; (3) анализ активности проявления гидрогенизации органического вещества и углеводородных соединений при массовом воздействии транзитных водородных потоков; (4) учёт индуцированных водородом процессов генерации метана и углекислого газа в пластовых условиях; (5) выбор критерии оценки чистоты водорода, качественного и количественного состава примесей.

При выборе мест расположения научно-технологических полигонов предпочтение следует отдавать объектам, расположенным в пределах нефтегазоносных провинций/бассейнов с мощностью осадочного чехла не менее 5–7 км. К числу таковых могут быть причислены впадины на границах древних и молодых платформ, а также впадины внутриконтинентальных рифтов. Кроме того, в качестве возможных полигонов могут быть добавлены щиты платформ, тектоно-седиментационные провинции подвижных поясов: межгорные впадины, средиземные и окраинно-континентальные моря и впадины межконтинентальных рифтов.

Учитывая отсутствие каких-либо специально проведённых работ по изучению природного водорода, авторы предлагают в качестве первоочередных объектов выбрать по одному объекту из предполагаемых наиболее перспективных и менее перспективных земель. По мнению авторов, в таком качестве могут быть выбраны два полигона в пределах Восточно-Европейской платформы, условно названные “Онежский” и “Астраханский”.

Полигон “Онежский” может быть расположен в районе скважины Онежская параметрическая (глубина 3537 м), вскрывшей доминантный флюидоупор на глубине 2944 м, представленный, в основном, галитом [10]. Онежская структура проявляет аналогию с геологическим строением объекта промышленного освоения водорода (Буракебуг, Мали), но имеет более выгодные условия сохранности этого газа.

Полигон “Астраханский” может быть размещён на Астраханском своде в районе скважины Астраханская 2-Д, вскрывшей на глубине более 6 км мощную толщу отложений (6–9 км),

выполняющую роль доминантного флюидоупора (рис. 5). Прогнозная зона аккумуляции водорода может располагаться под подошвой доманиковой сланцевой толщи, одновременно являющейся подошвой прогнозной автоклавной углеводородной системы [1].

Прогнозируется, что совокупность литологического вида изоляции (посредством соленосной и сланцевых толщ) с геофлюидодинамическим экранированием (за счёт формирования гигантской углеводородной системы с предельно высокими пластовыми давлениями) создаёт уникальные условия для сохранения водорода (а также гелия) под подошвой автоклавной углеводородной системы. Такую геологическую ситуацию следует рассматривать как весьма благоприятную обстановку формирования промышленно значимого месторождения водорода (и гелия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из-за высоких геологических рисков, обусловленных слабой геологической изученностью

процессов генерации и аккумуляции природного водорода, в настоящее время доступны лишь предварительные изыскания на научно-технологических полигонах, уточняющие условия локализации водорода в различных геолого-тектонических обстановках. Любые планы по постановке поисковых работ на водород на сегодняшний день следует считать преждевременными.

Крупные и уникальные местоскопления H_2 в пределах нефтегазоносных провинций/бассейнов вероятнее всего могут быть встречены на больших глубинах и под автоклавными углеводородными системами.

Наиболее оптимальное (с научных и практических позиций) решение – разработка методов извлечения водорода геологического происхождения совместно с традиционными энергоснабжающими, гелием, промышленно ценностями компонентами сопутствующих подземных вод и – шире – гидротермальными ресурсами и теплом земных недр. Такой подход снизит геологические, технические и экономические риски

АСТРАХАНСКАЯ ВНУТРИБАССЕЙНОВАЯ КАРБОНАТНАЯ ПЛАТФОРМА

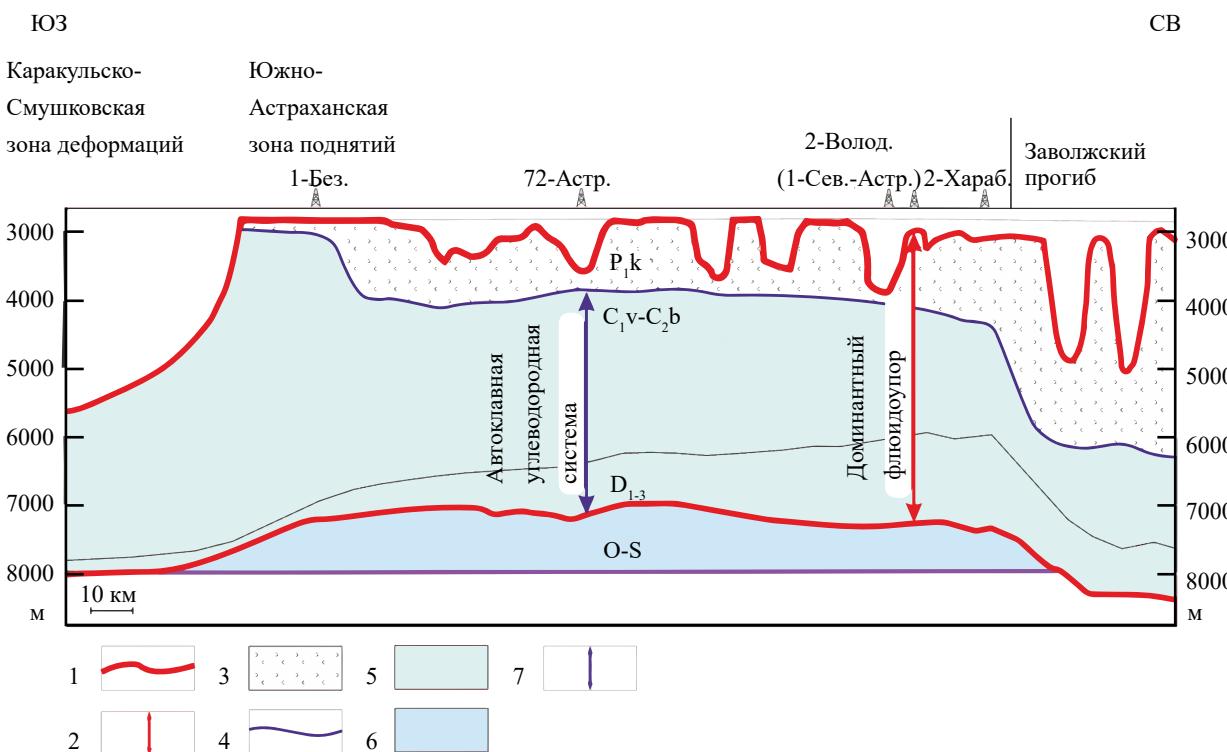


Рис. 5. Геофлюидодинамическая модель Астраханской платформы, в пределах которой возможно размещение научно-технологического полигона. Доминантный флюидоупор: 1 – границы, 2 – область распространения (мощность 4–8 км); 3 – соленосная толща мощностью 3–6 км; 4 – сульфатно-карбонатно-глинистый горизонт в основании соленосной толщи; автоклавная углеводородная система: 5 – область распространения, 6 – мощность 4–8 км; 7 – область потенциального водоронакопления

проведения поисковых работ, в наибольшей мере соответствует требованиям экологизации геологического производства, обеспечит научно-практическую основу комплексного освоения энергетический и минеральных ресурсов глубоких горизонтов литосферы, что можно считать задачей государственного уровня. В этой связи необходима разработка современной концепции поисков и освоения ресурсов жидких и газообразных полезных ископаемых в пределах глубоких горизонтов осадочного чехла нефтегазоносных провинций и мегабассейнов, а также консолидированной коры континентов в зонах её выхода на поверхность в пределах щитов древних платформ.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа написана по результатам работ, выполненных по государственному заданию ИПНГ РАН № 125020501406-8 (FMME-2025-0011) “Геологическое обоснование оптимальных условий природной и индуцированной внутрипластовой генерации водорода и его подземного хранения в истощенных месторождениях УВ и соляных структурах”, а также за счёт средств госбюджетного финансирования НИР ГИН РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абукова Л. А., Волож Ю. А. Флюидодинамика глубокопогруженных зон нефтегазонакопления осадочных бассейнов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 8. С. 1069–1080.
<https://doi.org/10.15372/GiG2021132>
2. Абукова Л. А., Сафарова Е. А., Филиппова Д. С., Поднек В. Э., Кияченко Ю. Ф., Юдин И. К., Исаева Г. Ю., Мельник А. Д., Бевзо М. О. Гидрохимические и микробиологические процессы, сопровождающие гибридное хранение водорода и метана в водоносных горизонтах // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. № 3.
<https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art14>
3. Исаев В. П. Термодинамические аспекты геохимии природных газов. Часть 2 // Иркутск: Издательство Иркутского университета, 1991. 192 с.
4. Ларин В. Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. М.: Недра, 1975. 100 с.
5. Левиунова С. П. Водород и его биогеохимическая роль в образовании углеводородных газов в осадочных породах земной коры / Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. н. М.: МГУ, 1994. 40 с.
6. Лейн А. Ю., Богданов Ю. А., Сагалевич А. М. и др. Новый тип гидротермального поля на Срединно-Атлантическом хребте (поле Лост-Сити, 30° с. ш.) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2004. Т. 394. № 3. С. 380–383.
7. Трофимук А. А., Молчанов В. И., Параев В. В. Особенности геодинамических обстановок формирования гигантских месторождений нефти и газа // Геология и геофизика. 1998. Т. 39(5). № 5. С. 673–682.
8. Пуха В. В., Нивин В. А., Мокрушина О. Д. Вариации концентраций молекулярного водорода в рыхлых отложениях Хибинского и Ловозерского массивов и их экзоконтактовых зон // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 312–317.
<https://doi.org/10.31241/FN S.2022.19.057>
9. Nazina T. N., Abukova L. A., Tourova T. P., Babich T. L., Bidzhieva S. K., Loiko N. G., Filippova D. S., Safarova E. A. Biodiversity and Potential Activity of Microorganisms in Underground Gas Storage Horizons // Sustainability. 2023. No. 15. 9945
<https://doi.org/10.3390/su15139945>
10. Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. 431 с.
11. Соколов В. А. Геохимия природных газов. М.: Недра, 1971. 337 с.
12. Патент РФ № 2316028С2. Способ поисков в недрах земли скоплений газообразных водорода и гелия // Кудрин И. В., ООО “Веттос”, МП-KG01V 11/00 (2006.01)
13. Федонкин М. А. Роль водорода и металлов в становлении и эволюции метаболических систем // Проблемы зарождения и эволюции биосфера (под ред. Э. М. Галимова). М.: Книжный дом “Либроком”, 2008. С. 417–437.
14. Филиппова Д. С. Водород в геологической среде: особенности генерации и аккумуляции // SOCAR Proceedings. 2023. Special Issue No. 2. С. 6–13.
<http://doi.org/10.5510/OGP2023SI200885>
15. Aimikhe V., Eyankware O. E. Recent Advances in White Hydrogen Exploration and Production: A Mini Review // J. Energy Res. Rev. 2023. V. 13. No. 4. P. 64–79.
<http://doi.org/10.9734/jenrr/2023/v13i4272>
16. Lapi T., Chatzimpiros P., Raineau A., Prinzhof A. System approach to natural versus manufactured hydrogen: An interdisciplinary perspective on a new primary energy source // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. No. 47(2).
<http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.039>
17. Parnell J., Blamey N. Global hydrogen reservoirs in basement and basins // Geochemical Transactions. 2017. Issue 18. No. 2.
<https://doi.org/10.1186/s12932-017-0041-4>

18. *Prinzhof A., Cissé C. S. T., Diallo A. B.* Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali) // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. 43(42). P. 19315–19326.
<http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
19. *Truche L., Jodin-Caumon M. C., Lerouge C. et al.* Sulphide mineral reactions in clay-rich rock induced by high hydrogen pressure. Application to disturbed or natural settings up to 250°C and 30 bar. // Chem. Geol. 2013. No. 351. P. 217–228.
<http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.05.025>
20. *Zgonnik V.* The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review // Earth-Science Reviews. 2020. No. 203. P. 103–140.
<http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>

THE SEARCH FOR NATURAL HYDROGEN IN RUSSIA: THE STATE OF THE PROBLEM AND POSSIBLE STARTING SOLUTIONS

© 2025 L. A. Abukova^{a, #}, Yu. A. Volozh^b, D. S. Filippova^a, E. A. Safarova^a

Presented by Academician of the RAS M.F. Fedonkin August 19, 2024

^a*Oil and Gas Research Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: abukova@ipng.ru*

By the time the decision was made (Rosstandart Order 07.07.2023 № 490-st) on the inclusion of hydrogen in the all-Russian classifier of minerals in Russia, research on the geological and economic analysis of the possibilities of industrial development of hydrogen resources had not been conducted. Moreover, fossil hydrogen has been studied extremely poorly. The current situation requires the accelerated development of a hydrogen search concept based on the scientific justification of the most promising regional areas of work. In the article, the authors present their vision of this problem and propose possible solutions. In particular, the necessity of organizing scientific and technological hydrogen polygons is argued, the tasks of which will include: (i) the development of theoretical ideas about the role of hydrogen in the evolution of the Earth; (ii) detailing the mechanisms of hydrogen localization in the geological environment; (iii) the development of criteria and methods for geological and economic assessment of hydrogen prospecting, exploration and production; (iv) conducting geological and commercial research at the most promising sites for the development and testing of methods for searching for deposits of hydrogen and related minerals.

Keywords: natural hydrogen, ancient platforms, great depths, serpentinization, radiolysis, microbiological processes of hydrogen generation, mineral and energy resources of the bowels of the Earth