

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ БАССЕЙНОВ

Оригинальная статья
УДК 621.6.028+579.66
EDN: FJCLFX

Выявление оптимального температурного режима размещения водорода в метанонасыщенных высокоминерализованных водоносных горизонтах: микробиологический аспект

А.Д. Мельник, Л.А. Абукова ✉, Е.А. Сафарова

Институт проблем нефти и газа РАН, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3

Аннотация. *Введение.* Актуальность работы обусловлена необходимостью минимизации потерь водорода при его внутрипластовой генерации (на истощенных месторождениях углеводородов) и подземном хранении (в геологических формациях). Основную роль в снижении объемов водорода на подобных геолого-промысловых объектах авторы отводят процессам жизнедеятельности аборигенных микробных сообществ пластовых вод, которые могут быть ответственны за потребление водорода, изменение компонентного состава газа и развитие коррозионных процессов. *Цель работы.* Экспериментальная оценка влияния температуры на активность микроорганизмов при размещении водорода в водоносных горизонтах подземных хранилищ газа, а также при индуцированной микробной генерации водорода в истощенных коллекторах старых нефтегазовых месторождений. *Материалы и методы.* Основным материал – пластовые воды щигровского горизонта Щелковского подземного хранилища газа, их химический состав и микробные сообщества. Представительность микробиоты оценивалась с использованием секвенирования 16S рРНК. Компонентный состав газа определялся методом газовой хроматографии, кинетика развития бактерий сульфатредукторов оценивалась спектрометром Photocor Compact. *Результаты.* Проведенные эксперименты позволили уточнить особенности накопления водорода (10–100 %) в высокоминерализованных водах в диапазоне температур 20–65 °С. В моделируемой обстановке показаны взаимозависимые изменения количественного состава между сероокисляющими бактериями и сульфатредукторами, в том числе снижение количества последних. *Заключение.* Экспериментально показано, что при температурах выше 50 °С развитие микробных сообществ существенно ингибировалось независимо от концентрации водорода. Полученные данные позволяют установить температурный диапазон – 50–65 °С, оптимальный для хранения водорода в высокоминерализованных пластовых водах за счет подавления активности водородотрофных микроорганизмов.

Ключевые слова: водород; метан; подземное хранение; сульфатредукция; внутрипластовая генерация; температура; микробные сообщества

Финансирование: статья написана в рамках государственного задания ИПНГ РАН (тема № 125020501406-8).

✉ Абукова Лейла Азретовна, abukova@ipng.ru

© Мельник А.Д., Абукова Л.А., Сафарова Е.А., 2026



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Мельник А.Д., Абукова Л.А., Сафарова Е.А. Выявление оптимального температурного режима размещения водорода в метанонасыщенных высокоминерализованных водоносных горизонтах: микробиологический аспект // Актуальные проблемы нефти и газа. 2026. EDN: FJCLFX

Введение

Важным, но малоизученным фактором, влияющим на сохранность водорода (H_2) в геологических формациях, является микробиологическая активность аборигенных сообществ в среде высокоминерализованных пластовых вод [1, 2]. Именно такие гидрохимические условия оптимальны для хранения водорода в соленосных формациях и в соляных кавернах, что теоретически и практически доказано в работах [3, 4]. Целью работы является экспериментальная оценка значимости влияния температуры на кинетику жизнедеятельности микроорганизмов при размещении водорода на объектах подземного хранения газа в водоносных горизонтах с высокоминерализованными водами, а также при индуцированной генерации H_2 в истощенных коллекторах старых нефтегазовых месторождений методом микробиологической ферментации.

Несмотря на растущий интерес к технологиям подземного хранения водорода, биокинетика в высокоминерализованных рассолах изучена фрагментарно. Тем не менее в работе показано, что аборигенные метаногены и сульфатредукторы активно потребляют H_2 в водоносных горизонтах и истощенных коллекторах, что ведет к существенным технологическим потерям [5–7]. При этом отмечено, что в соляных кавернах экстремальная соленость и специфические термические режимы способны подавлять

микробную активность [8, 9]. Количественные данные о температурной зависимости кинетики жизнедеятельности микробных сообществ именно в таких сложных гидрохимических условиях остаются противоречивыми и недостаточно систематизированными, что и обуславливает актуальность настоящих экспериментальных исследований для оптимизации условий безопасного геологического хранения [10].

В данной работе выполненные ранее исследования [5, 10, 11] дополнены следующими позициями анализа:

- уточнение температурного диапазона микробиологической активности при хранении и технически обусловленной генерации водорода в геологических формациях с высокоминерализованными водами, что позволяет существенным образом конкретизировать выбор геологических объектов для указанных целей;

- детализация механизмов изменения количественного состава сероокисляющих и сульфатредуцирующих бактерий, что может быть использовано для искусственного воздействия на рост доли водорода в газовых смесях.

- обоснование оптимального с микробиологических позиций соотношения содержания H_2 (20 %) в составе природных газовых смесей, что существенно повышает безопасный объем хранения водорода совместно с метаном в геологических резервуарах.

Для оценки степени микробиологической активности в аспекте генерации и последующего хранения водорода с метаном необходимо экспериментально оценить пороговые значения температуры и концентрации H_2 , при которых происходит переключение между доминирующими функциональными группами микроорганизмов.

Материалы и методы

В представленной работе в качестве модельного объекта выбрано Щелковское подземное хранилище газа (ПХГ), созданное в водоносном пласте щигровского горизонта верхнего девона, пластовые воды которого характеризуются высокой минерализацией и

низким содержанием сульфатов (табл. 1). Размещение подземных хранилищ в водоносных горизонтах (с водами высокой минерализации) является надежным технологическим решением в связи с тем, что водоносные горизонты эффективно выполняют изолирующую роль для газовых компонентов нижележащей флюидной системы. В таком контексте обоснован выбор Щелковского ПХГ в качестве модельного объекта для исследования микробиологической активности с учетом его характерных гидрогеохимических особенностей, среди которых определяющее значение имеет высокая минерализация пластовых вод (с низким содержанием сульфатов).

Табл. 1. Гидрохимическая характеристика щигровского водоносного комплекса Щелковского ПХГ (скв. 161)

Table 1. Hydrochemical characteristics of the Shchigrovsky aquifer complex of the Shchelkovo underground gas storage facility (well 161)

Глубина отбора пробы, м	Химический состав воды (мг/дм ³) [(мг-экв·л)]							Тип вод по Сулину
	Cl'	SO ₄ "	HCO ₃ '	Ca"	Mg"	K'+Na"	Общая минерализация	
930	75 250	3516,4	26,6	12 242,4	4076,6	28 789,1	123 963,91	ХК
	2122,71	73,2	0,436	610,96	335,38	1251,7	4394,386	

В работе использован комплекс полевых и экспериментальных методов:

Отбор проб пластовых вод из исследуемого объекта. Пробы пластовой воды отбирались с глубины 980 м из щигровского пласта-коллектора Щелковского ПХГ с помощью наливной желонки. Гидрохимический анализ показал, что воды характеризуются минерализацией 124 г/дм³, имеют рН = 6,6. В пробах воды обнаружены низшие жирные кислоты, включая уксусную кислоту в концентрации до 93 мг/дм³ и летучие кислоты состава C₃–C₅ с суммарной концентрацией 32 мг/дм³.

Фильтрация воды для получения концентрированной клеточной суспензии. Для

дальнейших работ проводилась пробоподготовка пластовой воды. Проба (1,5 л) пропусклась через фильтр на вакуумной фильтрационной установке, состоящей из вакуумного насоса, собирательной колбы, фильтровальной воронки с держателем, закрепленной на штативе, и фильтра (диаметр пор 0,22 мкм) (рис. 1а). Это позволяло отделить клеточный материал, а также собрать необходимый для проведения анализа объем биомассы. Биологический материал, собранный на фильтре, использовался для последующего выделения дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) и определения микробного состава образца (рис. 1б).



а/а



б/б

Рис. 1. Внешний вид вакуумной фильтрационной установки – мембранная фильтрация пластовой воды для сбора клеток ДНК:
а – фильтрационная установка; б – биологический материал на фильтре
(фото авторов)

Fig. 1. Vacuum filtration setup – membrane filtration of formation water for DNA/cell collection:
а – filtration setup; б – biological material on the filter
(photo by the authors)

Определение компонентного состава закачиваемого газа методом газовой хроматографии проводилось на программно-аппаратном комплексе «Хроматэк-Кристалл 5000».

Постановка накопительных культур микробного сообщества пластовых вод осуществлялась в среде чистого H_2 и газовых смесей водорода с метаном при содержании водорода 10–20 %.

Инкубирование проб проводилось при разных температурах в течение 2 месяцев.

Выполнена экстракция ДНК микробных сообществ накопительных культур и проведена постановка полимеразной цепной реакции (ПЦР).

Состав микробных сообществ определялся методом высокопроизводительного секвенирования по гену 16S рибосомной рибонуклеиновой кислоты (рРНК).

Оценка кинетики развития процессов сульфатредукции проводилась спектрометром Photocor Compact.

Выполнен анализ состава сообществ и оценка влияния физико-химических факторов на общую активность и жизнедеятельность микроорганизмов.

ДНК выделена с помощью наборов FastDNA Spin Kit for Soil (MP Biomedicals, США) в соответствии с протоколами производителя. Для гомогенизации пробы при помощи стеклянных микрочастиц использовался прибор TissueLyser LT (Qiagen, Германия). Для всех образцов перед дальнейшим анализом проводилось измерение количества тотальной ДНК с использованием флюориметра Qubit 2.0 (Thermo Fisher Scientific, США). Описанным выше способом были подготовлены 10 образцов из исследуемой пробы воды. Выполнено NGS профилирование микробных сообществ по гену 16S рРНК.

NGS профилирование микробных сообществ по гену 16S рРНК для каждого образца проводилось в двух проворностях. Для первичной оценки состава микробных сообществ использовался V4 участок гена 16S рРНК. Библиотеки готовились по схеме двух-стадийной ПЦР по схеме, описанной в работе Gohl и др. [12]. Система праймеров и общая методика постановки реакции представлена в работе Merkel и соавторов [13]. Результаты амплификации также использовали как качественный признак наличия биоматериала прокариот в пробах, используя тот же набор праймеров, что и для ампликонного профилирования. Амплификация осуществлялась с использованием системы CFX96 Touch Real-Time PCR Detection System (Bio-Rad Laboratories, USA) набора реагентов qPCRmix-HS SYBR (Evrogen, Россия). Секвенирование проводили с использованием набора реагентов MiSeq Reagent Micro Kit v2 (300-cycles) MS-103-1002 (Illumina, США) на секвенаторе MiSeq (Illumina, США) в соответствии с инструкцией производителя.

Результаты и обсуждение

Оценка влияния температурного фактора на рост аборигенной микробиоты

Деятельность микроорганизмов метаногенов, ацетогенов и сульфатредукторов очень чувствительна к условиям в пласте, на которые влияют такие факторы, как температура и минерализация вод. В немногочисленных исследованиях, посвященных данной проблематике, следует выделить работу [14], в которой рассматривается влияние пластовой температуры и минерализации вод на метаболическую активность указанных микробных групп. Эти факторы послужили важным ориентиром при планировании настоящих экспериментальных исследований, направленных на оценку поведения микробных сообществ в условиях варьирования компонентного состава газа в широком диапазоне температур (табл. 2). Точное определение диапазонов этих параметров имеет решающее значение для выбора объекта хранения и внутрипластовой генерации водорода, способствуя снижению потерь энергии от микробного метаболизма и повышению эффективности хранения.

Табл. 2. Оптимальные и критические диапазоны условий окружающей среды для микробного метаболизма

Table 2. Optimal and critical ranges of environmental factors for microbial metabolism

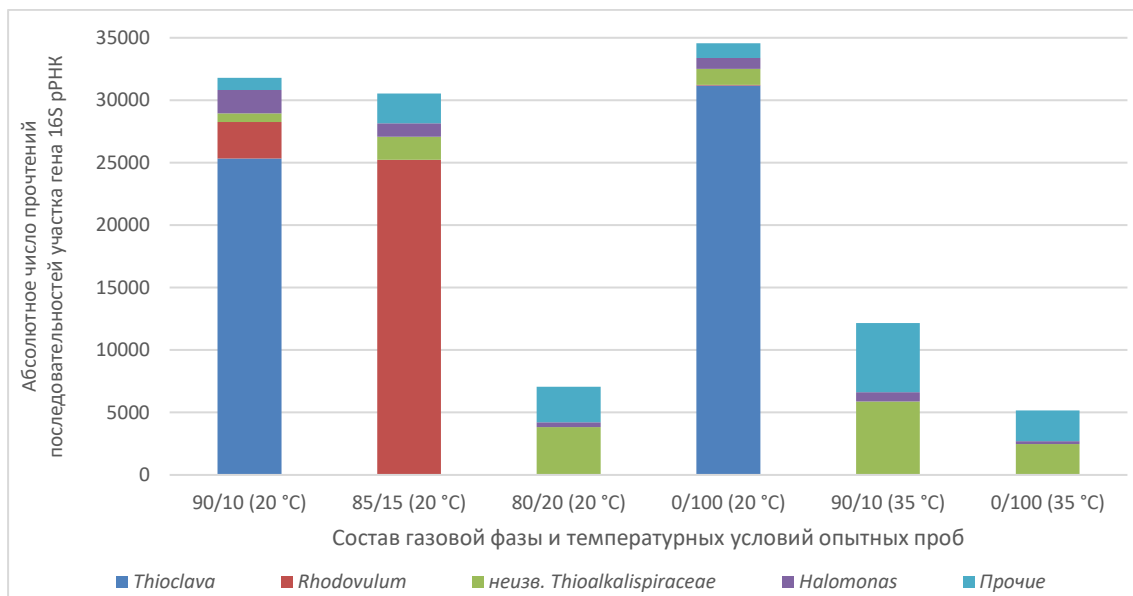
Тип процесса	Температура, °C		Минерализация, г/л	
	оптимальная	критическая	оптимальная	критическая
метаногенез	30–40	122	< 60	200
ацетогенез	20–30	72	< 40	300
сульфатредукция	20–30	113	< 100	240

Источник: / Source: [15–17]

В результате экспериментальной работы по инкубированию образцов при различных температурах получены данные

о составе микробных сообществ методом высокопроизводительного секвенирования по гену 16S рРНК (рис. 2).

а/а



б/б

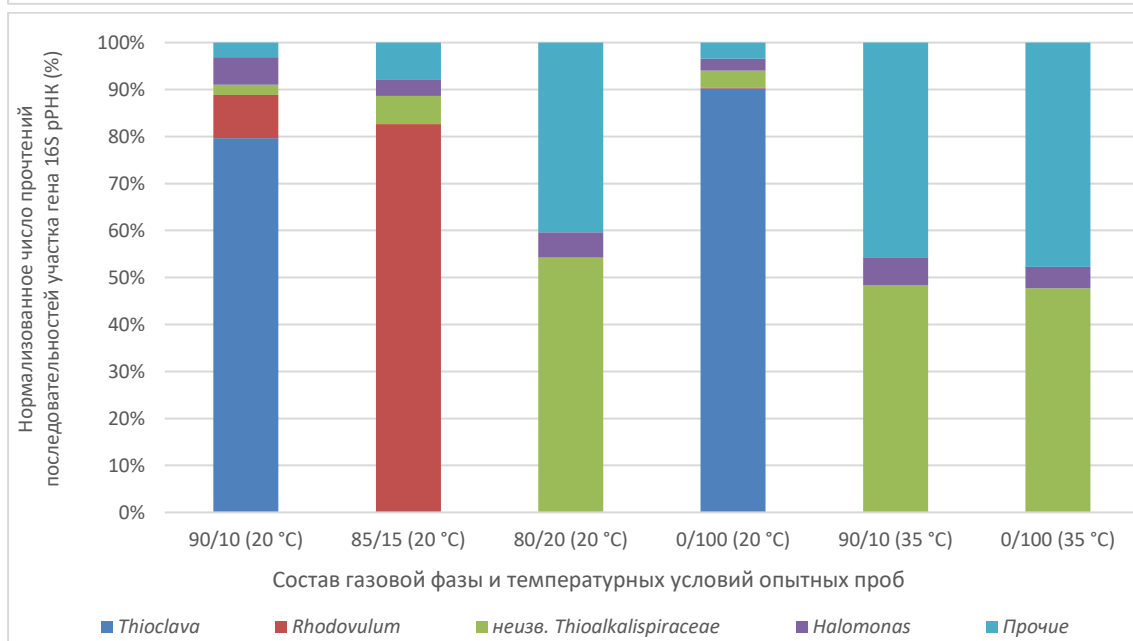


Рис. 2. Таксономический состав микробных сообществ (на уровне родов)

после инкубирования пластовых вод Щелковского ПХГ

при различных температурах и концентрациях H_2 в газовой фазе,

оцененный по числу прочтений участка маркерного гена 16S рРНК:

а – с использованием абсолютного числа прочтений участка маркерного гена 16S рРНК для каждого рода;

б – с использованием нормализованного числа прочтений участка маркерного гена 16S рРНК каждого вида (% от общего числа прочтений в пробе)

Fig. 2. Taxonomic composition of microbial communities (at the genus level)

after incubation of formation waters from the Shchelkovo underground gas storage facility under various temperatures and H_2 concentrations in the gas phase,

assessed by the number of reads of the 16S rRNA marker gene fragment:

a – using the absolute number of reads of the 16S rRNA marker gene region for each genus;

b – using the normalized read count for the 16S rRNA marker gene region of each species (% of the total number of reads in the sample)

В табл. 3 продемонстрирован результат постановки ПЦР. Пороговый цикл амплификации (cycle threshold, Ct) обратно пропорционален исходному содержанию матричной ДНК в пробе, что позволяет косвенно оценить относительную биомассу в исследуемых точках отбора. Так, в образцах № 7–10 амплификация целевых фрагментов ДНК методом ПЦР не наблюдалась, что может свидетельствовать о крайне низком содержании микробной биомассы. В данном случае отсутствие продукта самой ПЦР можно осторожно интерпретировать как

возможное ингибирование развития аборигенного микробного сообщества. Ключевым результатом эксперимента является, предположительно, резкое подавление микробиологической активности в температурном интервале выше 50 °C вне зависимости от содержания H₂ в газовой фазе. Следует подчеркнуть, что установленный температурный порог в 50 °C соответствует конкретно изучаемому объекту. Для иных геологических условий и термобарических обстановок предельные значения могут существенно варьироваться.

Табл. 3. Результаты инкубирования образцов при различных режимах температуры и концентраций водорода

Table 3. Incubation results at different temperatures and hydrogen concentrations

№ образца	Температура, °C	Содержание, %		Результат ПЦР
		Метан	Водород	
1	20	90,00	10,00	+
2	20	85,00	15,00	+
3	20	80,00	20,00	+
4	20	0,00	100,00	+
5	35	90,00	10,00	+
6	35	0,00	100,00	+
7	50	90,00	10,00	обл. повыш. t, °C
8	50	0,00	100,00	обл. повыш. t, °C
9	65	90,00	10,00	обл. повыш. t, °C
10	65	0,00	100,00	обл. повыш. t, °C

Примечание: «+» обозначает прирост ДНК в пробе.

Анализ изменений состава микробных сообществ в процессе инкубирования

Таксономический анализ исходной пробы воды выявил небогатую структуру аборигенного сообщества пластовых вод с доминированием двух функциональных групп (рис. 3). Абсолютным лидером является серо-окисляющий род *Thioalkalispira-Sulfurivermis* (филум *Desulfobacterota*, до 47 %), что указывает на ключевую роль хемолито-

трофного окисления серы. Вторым доминант – род *Desulfopila* (34 %, семейство *Desulfocapsaceae*), свидетельствующий о высокой активности сульфатредукции. Эти две линии формируют около 81 % сообщества, замыкая две ветви биогеохимического цикла серы. Оставшуюся часть (< 20 %) составляют некультивируемый кластер E6aC0₂ (6 %), род *Sediminimonas* (4 %), *Desulfohalotomaculum* и *Marinobacter* (по 2 %).

Таким образом, экосистема характеризуется низким разнообразием и высокой связью с циклом серы. *Desulfopila* – сульфатредукторы, окисляющие формат, пируват, лактат, фумарат, спирты и глицерин, преимущественно до ацетата, используя сульфат, сульфит и тиосульфат как акцепторы [18, 19]. Отдельные виды (например, *D. inferna*) способны к хемо-

литоавтотрофному росту на H_2 с фиксацией CO_2 [20], однако не извлекают электроны с поверхности $Fe(0)$ [21]. Это мезофилы (оптимум $\sim 35^\circ C$, pH 7,5–7,6), толерантные к колебаниям кислорода, широко распространенные в морских экосистемах, где подавляют метаногенез и участвуют в деградации продуктов ферментации [18, 20, 22].

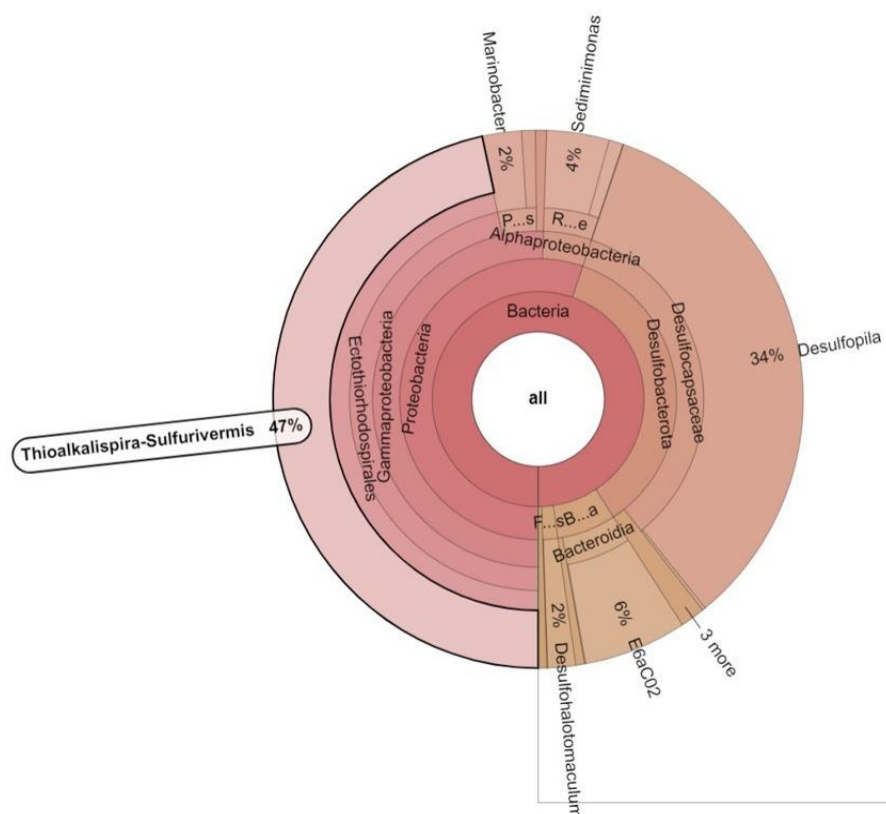


Рис. 3. Круговая диаграмма таксономического профиля микробного сообщества пластовых вод Щелковского ПХГ, построенная на основе 16S рРНК-секвенирования

Fig. 3. Krona chart of the taxonomic profile of the microbial community of the Shchelkovo underground gas storage facility formation waters based on 16S rRNA sequencing data

Источник / Source¹

¹ Абукова Л.А., Сафарова Е.А., Филиппова Д.С. Прогноз гидрохимических и микробиологических процессов, сопутствующих совместному хранению водорода и метана в подземных условиях // Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности. Сб. трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 35-летию ИПНГ РАН. М.: Институт проблем нефти и газа РАН, 2022. С. 354–358.

Abukova L.A., Safarova E.A., Filippova D.S. Forecasting hydrochemical and microbiological processes associated with the joint underground storage of hydrogen and methane. In: *Fundamental Basis of Innovative Technologies of Oil and Gas Industry: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation Dedicated to the 35th Anniversary of OGRI RAS*. Moscow: Oil and Gas Research Institute of the RAS, 2022. P. 354–358. (In Russ.).

После инкубирования при различных температурах и газовых режимах во всех вариантах доминировали представители филума *Pseudomonadota* (альфа- и гамма-протеобактерии семейств *Paracoccaceae* и *Thioalkalispiraceae*), тогда как доля сульфатредукторов заметно сократилась (см. рис. 3).

Семейство *Paracoccaceae* (альфа-протеобактерии) экологически пластично, особенно в морских биотопах, и объединяет аэробных хемогетеротрофов и анаэробных пурпурных несерных бактерий, активно участвующих в циклах серы и углерода. Род *Rhodovulum* (*R. sulfidophilum*) использует сульфид как донор электронов [23]. Род *Thioclava* включает аэробные виды, окисляющие серу (*T. pacifica*) и разлагающие углеводороды (*T. dalianensis*) [24–26]. Другой, широко представленный род *Halomonas* (*Pseudomonadota*), объединяет галотолерантных или галофильных аэробных хемоорганотрофов, некоторые из которых способны к аэробной денитрификации [16, 27, 28]. Эти организмы играют важную роль в трансформации азота и серы в засоленных экосистемах. Таким образом, доминирующие группы принадлежат к протеобактериям (сероокисляющим организмам), характерным для морских (*Paracoccaceae*) либо гиперсоленых и содовых водоемов (*Thioalkalispiraceae*).

Динамика микробных сообществ в процессе термического инкубирования демонстрирует выраженную сукцессию (см. табл. 3, рис. 2, 3).

Во всех условиях общая и относительная численность сульфатредукторов снижалась (рис. 4). При содержании H_2 10–15 % наблюдался активный рост сероокисляющих бактерий, которые совместно с сульфатредукторами замыкали цикл серы. Малая численность сульфатредукторов может быть обусловлена присутствием следов кислорода либо

исчерпанием органических доноров, тогда как *Thioalkalispira* продолжала автотрофный рост на восстановленных соединениях серы. При этом при соотношении содержания метана и водорода 80/20 число прочтений маркерного гена 16S рРНК является минимальным среди всех экспериментов при 20 °С, что может свидетельствовать о наименьшей активности микроорганизмов при заданных условиях. В образцах со 100%-ным содержанием водорода число прочтений гена 16S рРНК при 35° С снижено более чем в 5 раз относительно повторности при 20° С. При температурах > 50° С рост микроорганизмов значительно подавлялся, методами профилирования по гену 16S рРНК жизнедеятельность микроорганизмов отследить не удалось. Важно отметить, что высокая концентрация водорода не стимулировала рост сульфатредукторов: напротив, в пробах с максимальным содержанием H_2 общая численность снижалась. Следовательно, в условиях эксперимента и при моделировании конкретного объекта, температурный режим оказывает большее влияние на структуру сообщества и микробиологическую активность, чем доступность водорода.

Как можно судить по публикациям европейских ученых, оптимальным принимается объемное соотношение метана к водороду 90/10. Результаты экспериментов, проведенных в рамках исследования, показывают несколько иную картину. Так, наименьшая микробная активность в модельных пробах была выявлена для образцов, где в составе газовой фазы присутствовало 20 % водорода. Об этом свидетельствуют результаты секвенирования по гену 16S рРНК (абсолютная численность прочтений, см. рис. 3а) и результаты измерения количества ДНК в пробах, косвенно указывающие на объем биомассы микроорганизмов в образцах (см. рис. 4).

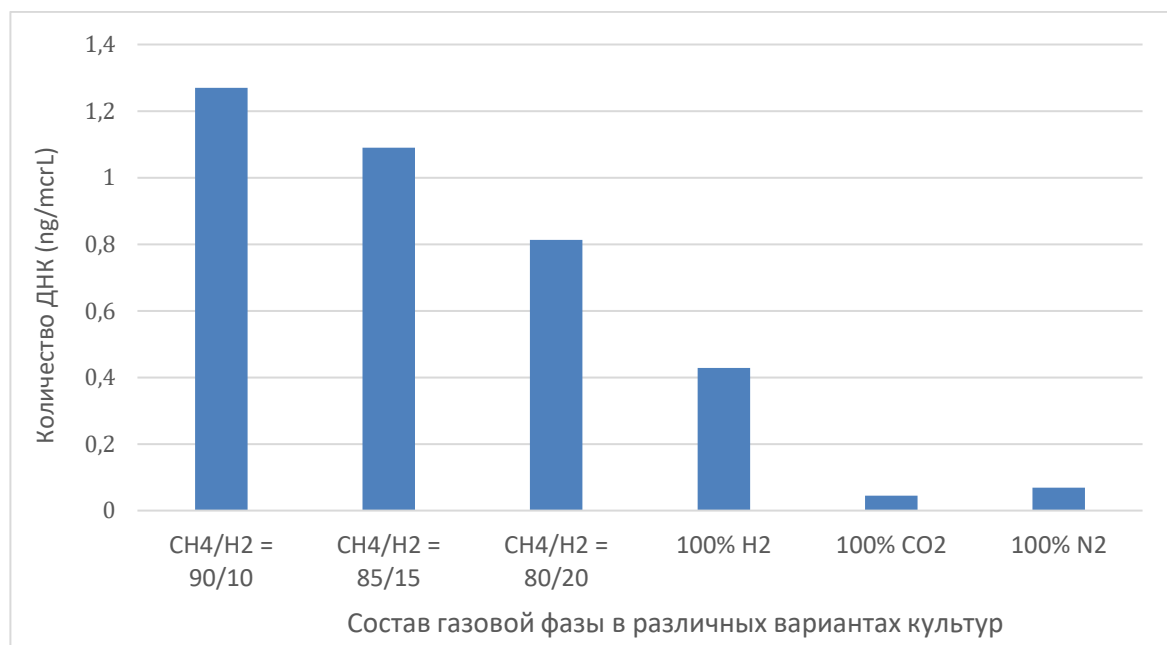


Рис. 4. Количество ДНК в обогащенных культурах из пробы пластовых вод Щелковского ПХГ (скв. 161), выращенных с использованием различных газовых фаз

Fig. 4. DNA amounts in enrichment cultures of the Shchelkovo underground gas storage facility formation waters (well 161) incubated under different gas phases

Так, экспериментальные результаты, полученные в ходе настоящей работы, можно рассматривать как предпосылку к возможности увеличить долю водорода до 20 % в газовых смесях для хранения в определенных геологических объектах. Речь идет о подземных хранилищах газа с более глубокими горизонтами хранения и экстремальными физико-химическими условиями, в первую очередь с более жестким температурным режимом ($> 50^{\circ}\text{C}$ в контексте анализируемого микробного сообщества) и повышенной минерализацией. Авторы работы высказывают предположение, что на таких объектах при условиях, приближенных к экспериментальным условиям настоящего исследования, микробиологическая активность будет снижена, что расширит возможности внутрипластовой генерации и хранения водорода в водоносных горизонтах с высокоминерализованной водой.

Для изучения кинетики развития бактерий сульфатредукторов в условиях

водородной газовой фазы использован метод динамического рассеяния света на спектрометре Photocor Compact [29]. Принцип метода основан на определении коэффициента диффузии дисперсных частиц в жидкости посредством анализа корреляционной функции флуктуаций интенсивности рассеянного света, что позволяет в режиме реального времени отслеживать динамику бактериальной популяции. В ходе эксперимента зафиксирована классическая четырех-фазная кривая роста: лаг-фаза (адаптация к среде), логарифмическая фаза (экспоненциальный рост), стационарная фаза (лимитирование по питательным веществам) и фаза отмирания. Оценка соответствия культивированной популяции указанным этапам жизненного цикла выполнялась с использованием пробирок Хангейта в многоканальном приборе Photocor при заполнении газовой фазы чистым водородом [11].

Эксперименты на пластовых водах щигровского горизонта Щелковского ПХГ (скв. 161) выявили прямую корреляцию численности популяции с количеством введенного водорода (рис. 5). Для корректного сравнения временных интервалов экспоненциальной фазы и фазы отмирания в различных образцах

плотность популяции нормирована к максимальному значению, зафиксированному в стационарной фазе. Полученная динамика соответствует классической модели кривой роста микробной популяции и подтверждает прогнозируемые закономерности для данного промыслового объекта.

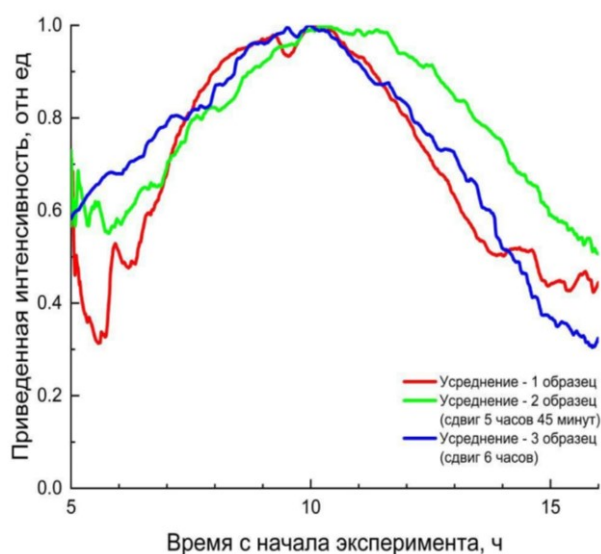


Рис. 5. Динамика интенсивности светорассеяния, зарегистрированная на спектрометре Photocor Compact и соответствующая жизненному циклу микробного сообщества из пробы пластовых вод Щелковского ПХГ (скв. 161)

Fig. 5. Light scattering intensity dynamics recorded using a Photocor Compact spectrometer during the life cycle of the microbial community of the Shchelkovo underground gas storage facility formation waters (well 161)

Полученное в результате экспериментального моделирования объемное соотношение CH_4/H_2 как 80/20 позволяет существенно увеличить объем водорода, который возможно хранить совместно с метаном в традиционных ПХГ с более высоким температурным режимом ($> 50^\circ \text{C}$ в контексте анализируемого микробного сообщества). Такое решение имеет свои технические и экономические преимущества по сравнению с европейской практикой, в которой это соотношение принято, как 90/10.

Проведенные эксперименты подчеркнули важность температуры как потенциально основного фактора, контролирующего микробиологическую активность в высокоминерализованных пластовых водах в рамках модельных условий. Для геологических объектов, характеризующихся условиями, приближенными к модельным, экспериментально предложенный порог в 50°C предположительно разделяет геологическую среду изучаемых категорий объектов на две потенциальные области применения различных технологий.

Во-первых, область предположительно безопасного хранения водорода, где геологические формации обладают температурами выше этого порога, характеризуется неблагоприятными экологическими условиями, подавляющими активность сульфатредукторов и метаногенов. Во-вторых, данная область подходит для индуцированной внутрипластовой генерации H_2 путем стимуляции аборигенной микробиоты. Для нее оптимальным является более низкотемпературный интервал 20–35 °C, обеспечивающий максимальную скорость ферментативных процессов. При этом, возможность повышения доли водорода в газовой смеси до 20 % (при соотношении $CH_4/H_2 = 80/20$) становится экономически более выгодной для практической реализации.

Заключение

1. Теоретическая значимость выполненных исследований состоит в следующем:

– Экспериментально подтверждена ключевая роль температуры в регуляции активности аборигенных микробных сообществ пластовых вод. Установлен критический порог в 50 °C, выше которого наблюдается ингибирование роста микроорганизмов, что является определяющим критерием при выборе геологических объектов для безопасного хранения водорода.

– Установлено, что в интервале температур 20–35 °C, оптимальном для внутрипластовой генерации водорода, возможно проявление высокой активности сульфатредукторов и сероокисляющих

бактерий. Выявленная сукцессия сообществ (снижение доли сульфатредукторов при росте сероокисляющих бактерий) свидетельствует о возможности естественного подавления коррозионно-опасных сульфидогенных процессов в геологических формациях как объектах хранения метановодородных смесей.

– Показано, что в рамках изучаемой системы увеличение доли водорода в газовой смеси с метаном до 20 % не стимулирует развитие микробных сообществ по сравнению с чистой водородной газовой средой. Это открывает перспективы для совместного хранения метана с большей долей водорода без существенного увеличения микробиологических рисков.

– Подтверждена гипотеза о том, что основным потребителем водорода в исследованных условиях являются сульфатредукторы, активность которых снижается с ростом температуры. Температурный режим является более значимым фактором, влияющим на структуру и функциональную активность сообщества, чем доступность водорода как субстрата.

2. Полученные результаты, имеющие прикладное значение: для проектирования подземных хранилищ водорода в условиях, подобных модельным, предположительно следует ориентироваться на горизонты с $T > 50$ °C, тогда как для создания внутрипластовых биореакторов с целью генерации водорода следует выбирать интервал 20–35 °C. Это разграничение, основанное на едином температурном критерии, составляет научно-практическую значимость работы.

Вклад авторов

Л.А. Абукова – концептуализация, методология, создание рукописи и ее редактирование.

А.Д. Мельник – формальный анализ, проведение исследования, методология, верификация данных, визуализация.

Е.А. Сафарова – проведение исследования, верификация данных, визуализация, создание черновика рукописи.

Конфликт интересов

Л.А. Абукова является членом редколлегии журнала «Актуальные проблемы нефти и газа».

Все авторы одобрили окончательную версию публикации.

Использование искусственного интеллекта

Инструменты искусственного интеллекта не использовались при подготовке данной рукописи.

Список источников

1. *Kularatne K., Moretti I.* Geological and geochemical pathways of onshore natural hydrogen generation // *Natural Hydrogen Systems: Properties, Occurrences, Generation Mechanisms, Exploration, Storage and Transportation* / Ed. by R. Rezaee, B.J. Evans. Berlin: De Gruyter, 2025. P. 105–130. <https://doi.org/10.1515/9783111437040-004>
2. *Prinzhofer A., Cacas-Stentz M.C.* Natural hydrogen and blend gas: a dynamic model of accumulation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48, No. 57. P. 21610–21623. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.060>
3. *Truche L., Donzé F.* Geological storage // *Hydrogen Storage: A Wide Range of Solutions* / Ed. by P. de Rango, F. Cuevas. London: ISTE, 2025. P. 57–98.
4. *Zgonnik V.* The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review // *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 203, No. 8. P. 103–140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>
5. *Назина Т.Н., Абукова Л.А., Турова Т.П. и др.* Микробное разнообразие и возможная активность в водоносных горизонтах подземных хранилищ газа // *Микробиология*. 2021. Т. 90, № 5. С. 589–600. <https://doi.org/10.31857/S002636562105013X>
6. *Bhadariya V., Jaspreet K., Prathamesh S., et al.* Hydrogen storage in porous media: Understanding and mitigating microbial risks for a sustainable future // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 67. P. 681–693. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.178>
7. *Tarkowski R., Uliasz-Misiak B.* Underground hydrogen storage: Insights for future development // *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 21. P. 5724. <https://doi.org/10.3390/en18215724>
8. *Panfilov M.* Underground and pipeline hydrogen storage // *Compendium of Hydrogen Energy*. Vol. 2. Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure / Ed. by R.B. Gupta, A. Basile, T.N. Veziroğlu. Cambridge: Woodhead, 2016. P. 91–115. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00004-3>
9. *Bagchi C., Patwardhan S.D., Iglauer S., et al.* A critical review on parameters affecting the feasibility of underground hydrogen storage // *ACS Omega*. 2025. Vol. 10, No. 12. P. 11658–11696. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10442>

10. Nazina T.N., Abukova L.A., Tourova T.P., et al. Biodiversity and potential activity of microorganisms in underground gas storage horizons // Sustainability. 2023. Vol. 15, No. 13. P. 9945. <https://doi.org/10.3390/su15139945>
11. Абукова Л.А., Сафарова Е.А., Филиппова Д.С. и др. Гидрохимические и микробиологические процессы, сопровождающие гибридное хранение водорода и метана в водоносных горизонтах // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. Вып. 3(42). С. 221–234. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art14>
12. Gohl D.M., Vangay P., Garbe J., et al. Systematic improvement of amplicon marker gene methods for increased accuracy in microbiome studies // Nature Biotechnology. 2016. Vol. 34, No. 9. P. 942–949. <https://doi.org/10.1038/nbt.3601>
13. Меркель А.Ю., Тарновецкий И.Ю., Подосокорская О.А., Тоцаков С.В. Анализ систем праймеров на ген 16S рРНК для профилирования термофильных микробных сообществ // Микробиология. 2019. Т. 88, № 6. С. 655–664. <https://doi.org/10.1134/S0026365619060119>
14. Thaysen E.M., McMahon S., Strobel G.J., et al. Estimating microbial growth and hydrogen consumption in hydrogen storage in porous media // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 151. P. 111481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111481>
15. Heinemann N., Alcalde J., Miocic J.M., et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges // Energy & Environmental Science. 2021. Vol. 14, No. 2. P. 853–864. <https://doi.org/10.1039/D0EE03536J>
16. Zeng L., Sarmadivaleh M., Saeedi A., et al. Storage integrity during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs // Earth-Science Reviews. 2023. Vol. 247. P. 104625. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104625>
17. Qu X., Zeng H., Gao Y., et al. Bio-hydrogen production by dark anaerobic fermentation of organic wastewater // Frontiers in Chemistry. 2022. Vol. 10. P. 978907. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.978907>
18. Song J., Hwang J., Kang I., Cho J.C. A sulfate-reducing bacterial genus, *Desulfosediminicola* gen. nov., comprising two novel species cultivated from tidal-flat sediments // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, No. 1. P. 19978. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99469-5>
19. Diao M., Dykma S., Koeksoy E., et al. Global diversity and inferred ecophysiology of microorganisms with the potential for dissimilatory sulfate/sulfite reduction // FEMS Microbiology Reviews. 2023. Vol. 47, No. 5. P. fuad058. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuad058>
20. Hausmann B., Knorr K.-H., Schreck K., et al. Consortia of low-abundance bacteria drive sulfate reduction-dependent degradation of fermentation products in peat soil microcosms // The ISME Journal. 2016. Vol. 10, No. 10. P. 2365–2375. <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.42>
21. Liang D., Liu X., Woodard T.L., et al. Extracellular electron exchange capabilities of *Desulfovibrio ferrophilus* and *Desulfopila corrodens* // Environmental Science & Technology. 2021. Vol. 55, No. 23. P. 16195–16203. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04071>
22. Liang Q.Y., Zhang J.Y., Ning D., et al. Niche modification by sulfate-reducing bacteria drives microbial community assembly in anoxic marine sediments // mBio. 2023. Vol. 14, No. 2. P. e0353522. <https://doi.org/10.1128/mbio.03535-22>
23. Jia R., Yang D., Xu D., Gu T. Anaerobic corrosion of 304 stainless steel caused by the *Pseudomonas aeruginosa* biofilm // Frontiers in Microbiology. 2017. Vol. 8. P. 2335. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02335>

24. Chen D., Fan H., Tang S., et al. *Thioclava litoralis* sp. nov., a novel species of alphaproteobacterium, isolated from surface seawater // Archives of Microbiology. 2024. Vol. 206, No. 7, P. 333. <https://doi.org/10.1007/s00203-024-04057-6>
25. Liu Y., Lai Q., Shao Z. A multilocus sequence analysis scheme for phylogeny of *Thioclava* bacteria and proposal of two novel species // Frontiers in Microbiology. 2017. Vol. 8. P. 1321. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01321>
26. Chang R., Bird L., Barr C., et al. *Thioclava electrotropha* sp. nov., a versatile electrode and sulfur-oxidizing bacterium from marine sediments // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2018. Vol. 68, No. 5. P. 1652–1658. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002723>
27. Ye J.W., Chen G.Q. *Halomonas* as a chassis // Essays in Biochemistry. 2021. Vol. 65, No. 2. P. 393–403. <https://doi.org/10.1042/EBC20200159>
28. Wang L., Shao Z. Aerobic denitrification and heterotrophic sulfur oxidation in the genus *Halomonas* revealed by six novel species characterizations and genome-based analysis // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. P. 652766. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.652766>
29. Chu B. Laser Light Scattering: Basic Principles and Practice. 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press, 1991. 343 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-174551-6.X5001-0>

Информация об авторах

Лейла Азретовна Абукова – д-р геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; SPIN-код: 4282-3946, <https://orcid.org/0000-0002-8984-7907>; e-mail: abukova@ipng.ru

Арсений Дмитриевич Мельник – младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; SPIN-код: 1751-6934, <https://orcid.org/0009-0002-0001-8430>; e-mail: 14amelnikd@gmail.com

Елисавета Александровна Сафарова – заведующий центром, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; SPIN-код: 6005-4416, <https://orcid.org/0000-0002-6137-0844>; e-mail: safarova@ipng.ru

Поступила в редакцию 11.07.2026

Принята к публикации 21.09.2026

NEW METHODS AND TECHNOLOGIES OF STUDYING THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF OIL AND GAS BASINS

Original article

Identification of the optimal temperature regime for the placement of hydrogen in methane-saturated highly mineralized aquifers: Microbiological aspect

Arseniy D. Melnik, Leyla A. Abukova ✉, Elisaveta A. Safarova

Oil and Gas Research Institute Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina St., Moscow, 119333, Russia

Abstract. *Introduction.* The relevance of the work is due to the need to minimize hydrogen losses during its in situ generation (in depleted hydrocarbon deposits) and underground storage (in geological formations). The authors attribute the main role in reducing hydrogen volumes at such geological and field-based facilities to the processes of vital activity of indigenous microbial communities in formation waters, which may be responsible for hydrogen consumption, changes in the component composition of the gas, and the development of corrosion processes. *Objective.* To experimentally assess the effect of temperature on microbial activity under conditions relevant to hydrogen storage in aquifers of underground gas storage facilities, as well as during microbially induced hydrogen generation in depleted reservoirs of mature oil and gas fields. *Materials and methods.* Formation waters from the Shchigrov horizon of the Shchelkovo underground gas storage facility were used as the primary study material, including their chemical composition and associated microbial communities. Microbial diversity and representativeness were evaluated using 16S rRNA gene sequencing. Gas composition was determined by gas chromatography, while the growth kinetics of sulfate-reducing bacteria were monitored using a Photocor Compact spectrometer. *Results.* The experiments enabled refinement of the conditions governing hydrogen accumulation (10–100%) in highly mineralized waters over a temperature range of 20–65 °C. Under the modeled conditions, shifts in the relative abundance of sulfur-oxidizing bacteria and sulfate-reducing bacteria were observed, including a decrease in the latter. It was further demonstrated that microbial activity was substantially inhibited at temperatures above ~50 °C, irrespective of hydrogen concentration. *Conclusion.* The experimental data indicate that microbial community development is substantially inhibited at temperatures above 50 °C, irrespective of hydrogen concentration. These results support defining a temperature range of 50–65 °C as optimal for hydrogen storage in highly mineralized formation waters, owing to the suppression of hydrogenotrophic microorganism activity.

Keywords: hydrogen; methane; underground storage; sulfate reduction; in situ generation; temperature; microbial communities

Funding: the work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. 125020501406-8).

For citation: Melnik A.D., Abukova L.A., Safarova E.A. Identification of the optimal temperature regime for the placement of hydrogen in methane-saturated highly mineralized aquifers: Microbiological aspect. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2026. (In Russ.).

✉ Leyla A. Abukova, abukova@ipng.ru

© Melnik A.D., Abukova L.A., Safarova E.A., 2026



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Author contributions

Leyla A. Abukova – conceptualization, methodology, writing – review & editing.

Arseniy D. Melnik – formal analysis, investigation, methodology, validation, visualization.

Elisaveta A. Safarova – investigation, validation, visualization, writing – original draft.

Conflict of interests

Leyla A. Abukova is a member of the Editorial Board of the journal *Actual Problems of Oil and Gas*.

All the authors approved the final version of the publication.

Use of artificial intelligence

No artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

References

1. Kularatne K., Moretti I. Geological and geochemical pathways of onshore natural hydrogen generation. In: Rezaee R., Evans B.J., eds. *Natural Hydrogen Systems: Properties, Occurrences, Generation Mechanisms, Exploration, Storage and Transportation*. Berlin: De Gruyter, 2025. P. 105–130. <https://doi.org/10.1515/9783111437040-004>
2. Prinzhofer A., Cacas-Stentz M.C. Natural hydrogen and blend gas: a dynamic model of accumulation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48, No. 57. P. 21610–21623. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.060>
3. Truche L., Donzé F. Geological storage. In: de Rango P., Cuevas F., eds. *Hydrogen Storage: A Wide Range of Solutions*. London: ISTE, 2025. P. 57–98. <https://doi.org/10.1002/9781394401635.ch2>
4. Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 203, No. 8. P. 103–140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>
5. Nazina T.N., Abukova L.A., Tourova T.P., et al. Diversity and possible activity of microorganisms in underground gas storage aquifers. *Microbiology*. 2021. Vol. 90, No. 5. P. 621–631. <https://doi.org/10.1134/S002626172105012X>
6. Bhadariya V., Jaspreet K., Prathamesh S., et al. Hydrogen storage in porous media: Understanding and mitigating microbial risks for a sustainable future. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 67. P. 681–693. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.178>
7. Tarkowski R., Uliasz-Misiak B. Underground hydrogen storage: Insights for future development. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 21. P. 5724. <https://doi.org/10.3390/en18215724>
8. Panfilov M. Underground and pipeline hydrogen storage. In: Gupta R.B., Basile A., Veziroğlu T.N., eds. *Compendium of Hydrogen Energy*. Vol. 2. *Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure*. Cambridge: Woodhead, 2016. P. 91–115. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00004-3>
9. Bagchi C., Patwardhan S.D., Iglauer S., et al. A critical review on parameters affecting the feasibility of underground hydrogen storage. *ACS Omega*. 2025. Vol. 10, No. 12. P. 11658–11696. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10442>

10. Nazina T.N., Abukova L.A., Tourova T.P., et al. Biodiversity and potential activity of microorganisms in underground gas storage horizons. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 13. P. 9945. <https://doi.org/10.3390/su15139945>
11. Abukova L.A., Safarova E.A., Filippova D.S., et al. Hydrochemical and microbiological processes accompanying hybrid storage of hydrogen and methane in aquifers. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2023. No. 3(42). P. 221–234. (In Russ.). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art14>
12. Gohl D.M., Vangay P., Garbe J., et al. Systematic improvement of amplicon marker gene methods for increased accuracy in microbiome studies. *Nature Biotechnology*. 2016. Vol. 34, No. 9. P. 942–949. <https://doi.org/10.1038/nbt.3601>
13. Merkel A.Yu., Tarnovetskii I.Yu., Podosokorskaya O.A., Toshchakov S.V. Analysis of 16S rRNA primer systems for profiling of thermophilic microbial communities. *Microbiology*. 2019. Vol. 88, No. 6. P. 671–680. <https://doi.org/10.1134/S0026261719060110>
14. Thaysen E.M., McMahon S., Strobel G.J., et al. Estimating microbial growth and hydrogen consumption in hydrogen storage in porous media. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 151. P. 111481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111481>
15. Heinemann N., Alcalde J., Miocic J.M., et al. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges. *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 14, No. 2. P. 853–864. <https://doi.org/10.1039/D0EE03536J>
16. Zeng L., Sarmadivaleh M., Saeedi A., et al. Storage integrity during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs. *Earth-Science Reviews*. 2023. Vol. 247. P. 104625. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104625>
17. Qu X., Zeng H., Gao Y., et al. Bio-hydrogen production by dark anaerobic fermentation of organic wastewater. *Frontiers in Chemistry*. 2022. Vol. 10. P. 978907. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.978907>
18. Song J., Hwang J., Kang I., Cho J.C. A sulfate-reducing bacterial genus, *Desulfosediminicola* gen. nov., comprising two novel species cultivated from tidal-flat sediments. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, No. 1. P. 19978. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99469-5>
19. Diao M., Dykema S., Koeksoy E., et al. Global diversity and inferred ecophysiology of microorganisms with the potential for dissimilatory sulfate/sulfite reduction. *FEMS Microbiology Reviews*. 2023. Vol. 47, No. 5. P. fuad058. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuad058>
20. Hausmann B., Knorr K.-H., Schreck K., et al. Consortia of low-abundance bacteria drive sulfate reduction-dependent degradation of fermentation products in peat soil microcosms. *The ISME Journal*. 2016. Vol. 10, No. 10. P. 2365–2375. <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.42>
21. Liang D., Liu X., Woodard T.L., et al. Extracellular electron exchange capabilities of *Desulfovibrio ferrophilus* and *Desulfopila corrodens*. *Environmental Science & Technology*. 2021. Vol. 55, No. 23. P. 16195–16203. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04071>
22. Liang Q.Y., Zhang J.Y., Ning D., et al. Niche modification by sulfate-reducing bacteria drives microbial community assembly in anoxic marine sediments. *mBio*. 2023. Vol. 14, No. 2. P. e0353522. <https://doi.org/10.1128/mbio.03535-22>
23. Jia R., Yang D., Xu D., Gu T. Anaerobic corrosion of 304 stainless steel caused by the *Pseudomonas aeruginosa* biofilm. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. P. 2335. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02335>

24. Chen D., Fan H., Tang S., et al. *Thioclava litoralis* sp. nov., a novel species of alphaproteobacterium, isolated from surface seawater. *Archives of Microbiology*. 2024. Vol. 206, No. 7, P. 333. <https://doi.org/10.1007/s00203-024-04057-6>
25. Liu Y., Lai Q., Shao Z. A multilocus sequence analysis scheme for phylogeny of *Thioclava* bacteria and proposal of two novel species. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. P. 1321. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01321>
26. Chang R., Bird L., Barr C., et al. *Thioclava electrotropha* sp. nov., a versatile electrode and sulfur-oxidizing bacterium from marine sediments. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2018. Vol. 68, No. 5. P. 1652–1658. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002723>
27. Ye J.W., Chen G.Q. *Halomonas* as a chassis // *Essays in Biochemistry*. 2021. Vol. 65, No. 2. P. 393–403. <https://doi.org/10.1042/EBC20200159>
28. Wang L., Shao Z. Aerobic denitrification and heterotrophic sulfur oxidation in the genus *Halomonas* revealed by six novel species characterizations and genome-based analysis. *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. P. 652766. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.652766>
29. Chu B. *Laser Light Scattering: Basic Principles and Practice*. 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press, 1991. 343 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-174551-6.X5001-0>

Information about the authors

Leyla A. Abukova – Dr. Sci. (Geol.-Min.), Head of Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8984-7907>; e-mail: abukova@ipng.ru

Arseniy D. Melnik – Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0009-0002-0001-8430>; e-mail: 14amelnikd@gmail.com

Elisaveta A. Safarova – Head of Center, Researcher, Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6137-0844>; e-mail: safarova@ipng.ru

Received 11 July 2026

Accepted 21 September 2026