

НОВООБРАЗОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ И ВТОРИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ СКВАЖИН ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА

© Коллектив авторов,
2024



Н.К. Кулагина^{1,*}, М.П. Хайдина¹, О.В. Постникова¹, А.Н. Абрамов¹, Л.Э. Алескерова², К.А. Шибзухова², А.М. Неугодов², Д.А. Гурбанпесов³

¹Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, РФ, Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, РФ, Москва

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, РФ, Пермь

Электронный адрес: kulagina.n@gubkin.ru

Введение. Участие биоценозов в формировании различных минералов изучается довольно давно. Но в ряде случаев роль бактериального минералообразования в накоплении осадочных толщ не очевидна. Так, например, формирование вторичных минералов в призабойных частях скважин на подземных хранилищах газа долгое время не изучалось. Хотя давно известны случаи, когда вторичные минералы биогенной и биохемогенной природы оказывали существенное влияние на фильтрационно-емкостные свойства пород и на техническое состояние конструкций скважин.

Цель. Для качественной работы скважин и понимания процесса вторичного минералообразования бактериальным путем в работе изучены новообразованные минералы и матрикс породы призабойных зон скважин подземных хранилищ газа (ПХГ).

Материалы и методы. Для изучения пород, минеральный состав и фильтрационно-емкостные свойства которых были изменены бактериальным воздействием, проводились исследования на растровом электронном микроскопе (РЭМ), оптическом микроскопе, дифрактометре, а также различные оптические исследования.

Результаты. В ходе работы выявлены группы новообразованных минералов (анкерит, пирит, полевые шпаты) и определены их генезисы. Установлено, что основную роль в формировании таких минералов играли бактериальные биоценозы.

Заключение. Объем и свойства фильтрационно-емкостного пространства пород-коллекторов в ПХГ во многом определяются широким комплексом геологических, биогенных, биохемогенных и технологических факторов.

Ключевые слова: вторичное минералообразование, бактериальное минералообразование, подземные хранилища газа

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кулагина Н.К., Хайдина М.П., Постникова О.В., Абрамов А.Н., Алескерова Л.Э., Шибзухова К.А., Неугодов А.М., Гурбанпесов Д.А. Новообразование минералов и вторичные преобразования призабойной зоны скважин подземных хранилищ газа. ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024;9(4):135–140. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-135-140>

Статья поступила в редакцию 10.09.2024

Принята к публикации 04.10.2024

Опубликована 27.12.2024

NEW FORMATION OF MINERALS AND SECONDARY TRANSFORMATIONS OF THE BOTTOMHOLE ZONE OF UNDERGROUND GAS STORAGE WELLS

Nadezhda K. Kulagina^{1,*}, Maria P. Khaidina¹, Olga V. Postnikova¹, Alexander N. Abramov¹, Leila E. Aleskerova², Karina A. Shibzuhova², Artyom M. Neugodov², Daniil A. Gurbannepesov³

¹National University of Oil and Gas «Gubkin University», RF, Moscow

²Lomonosov Moscow State University, RF, Moscow

³Perm National Research Polytechnic University RF, Perm

E-mail: kulagina.n@gubkin.ru

Introduction. The participation of biocenoses in the formation of various minerals has been studied and proved for quite a long time. But in some cases their role in the formation of sedimentary strata is not obvious. For example, the formation of secondary minerals in bottom-hole parts of wells at underground gas storages remained unstudied for a long time. In a number of wells such minerals had a strong negative influence on filtration-capacity properties of rocks and structural parts of wells.

Aim. In order to optimize well operation and to understand the process of mineral formation by bacterial pathway, newly formed minerals and rock matrix of bottomhole zones of underground gas storage wells were studied.

Materials and methods. To study the mineral and bacterial composition of the rocks we carried out studies on scanning electron microscope, optical microscope, diffractometer, as well as various optical studies.

Results. The groups of newly formed minerals were revealed and their genesis was determined; bacterial biocenoses played the greatest role in the formation of such minerals.

Conclusion. The volume and properties of filtration-capacity space of UGS reservoir rocks are largely determined by a wide complex of geological, biogenic, bio-chemogenic and technological factors.

Keywords: secondary mineral formation, bacterial mineral formation, UGS facilities

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Kulagina N.K, Khaidina M.P, Postnikova O.V., Abramov A.N., Aleskerova L.E., Shibzuhova K.A., Neugodov A.M., Gurbannesov D.A. New formation of minerals and secondary transformations of the bottomhole zone of underground gas storage wells. PRONEFT. Professionally about oil. 2024;9(4):135–140. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-135-140>

Manuscript received 10.09.2024

Accepted 04.10.2024

Published 27.12.2024

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для газовой отрасли характерны процессы внедрения в существующую газовую инфраструктуру нетипичных для нее газов, в том числе: неуглеводородных газов (включая водород — H_2 , двуокись углерода — CO_2 , сероводород — H_2S , гелий и др.), биогаза, искусственного метана и др.

оборудовании скважин и в пустотном пространстве пород-коллекторов вторичных минералов, изменению состава природного газа, интенсификации коррозии и другим неблагоприятным процессам.

Изучение вторичного минералообразования является важным для понимания структуры порового пространства пород-коллекторов. Как правило, емкостные свойства пород-коллекторов претерпевают значительные изменения в процессе седиментогенеза, диагенеза и катагенеза. На каждой из этих стадий происходят значительные изменения структуры пород, морфологии и свойств пустотного пространства. В последние годы в результате развития электронной микроскопии выявлено значительное количество микробиальных минеральных новообразований в пустотном пространстве пород-коллекторов нефтегазовых пластов. Эти образования формируются не только в пустотах, но и на конструктивных элементах эксплуатационных скважин, пробуренных в пределах подземных хранилищ газа.

Для решения описанного вопроса в работе проведены исследования образцов терригенных пород из скважин ПХГ, которые взяты непосредственно со стенок фильтра, стоящего на забое скважины и образцы, которые были выброшены по заколонному пространству на устье скважины. В образцах выделен широкий спектр вторичных преобразований, которые можно разделить на четыре типа по генетическому признаку. К первому типу отнесены аутигенные кристаллы кварца и полевых шпатов, которые сформировались в процессе катагенетических преобразований. Эти кристаллы имеют правильные кристаллографические очертания и соответствующий габитус кристалла (рис. 1, 2).

Ко второму типу минеральных новообразований отнесены аутигенные кристаллы анкерита, которые имеют биохемогенную природу.

ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КАЧЕСТВЕННОЙ РАБОТЫ СКВАЖИН И ПОНИМАНИЯ ПРОЦЕССА ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ БАКТЕРИАЛЬНЫМ ПУТЕМ ИЗУЧЕНЫ НОВООБРАЗОВАННЫЕ МИНЕРАЛЫ И МАТРИКС ПОРОДЫ ПРИЗАБОЙНЫХ ЗОН СКВАЖИН ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА. УСТАНОВЛЕНО, ЧТО ОСНОВНУЮ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ТАКИХ МИНЕРАЛОВ ИГРАЮТ БАКТЕРИАЛЬНЫЕ БИОЦЕНОЗЫ.

Такие газы инициируют в коллекторах подземных хранилищ различные нехарактерные для них ранее химические процессы, которые приводят к формированию на подземном

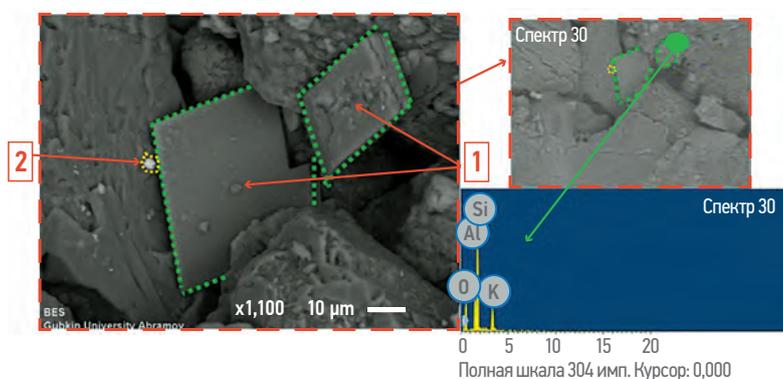


Рис. 1. Аутигенные кристаллы, сформированные в пустотном пространстве пород-коллекторов (1 — полевые шпаты, 2 — пирит). Составлено авторами: А.Н. Абрамов, Н.К. Кулагина, М.П. Хайдина, О.В. Постникова

Fig. 1. Authigenic crystals formed in the reservoir rocks porous space (1 — feldspar, 2 — pyrite). Compiled by the authors: Alexander N. Abramov, Nadezhda K Kulagina, Maria P. Khaidina, Olga V. Postnikova

Вероятнее всего, он образовался в результате нарушения равновесия в кристаллизационной среде, обусловленного жизнедеятельностью бактериальных биоценозов (рис. 3). Третий тип аутигенных минералов относится к чисто биогенным и является продуктом бактериальной жизнедеятельности [1]. К этому типу отнесен вторичный пирит (рис. 4). Сульфатредуцирующие бактерии способны достаточно активно формировать фрамбоиды и кокки пиритового состава, которые встречаются повсеместно [2]. Источником железистой и серной компоненты для пирита являлись непосредственно природные минеральные образования и техногенные растворы, которыми обрабатывается призабойная зона. Крайне специфическим минеральным образованием являются аморфные по своей структуре окислы железа, покрывающие стенки фильтра. Анализ этих образований на РЭМ показал, что они представляют собой продукты жизнедеятельности бактериальных организмов. Аморфную структуру этих образований определяет тот факт, что микрондовый анализ показывает в них очень высокое содержание железа, а рентгеноструктурный анализ, реагирующий на кристаллическую решетку, железосодержащих минералов не фиксирует (рис. 5).

Исследование образцов, выброшенных на устье скважины и изученных с помощью различных методов сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (рис. 6А), показало наличие палочковидных форм бактериальных клеток, покрытых внеклеточным матриком. Можно предположить,

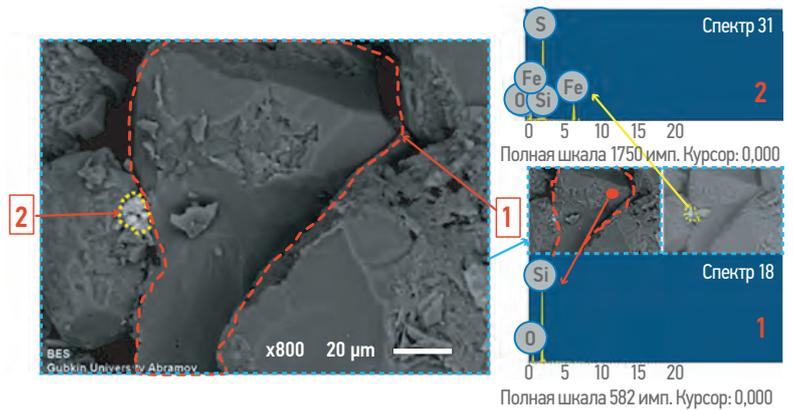


Рис. 2. Новообразованные кристаллы кварца (1) и пирита (2). Составлено авторами: А.Н. Абрамов, Н.К. Кулагина, М.П. Хайдина, О.В. Постникова
Fig. 2. New formed quartz (1) and pyrite (2). Compiled by the authors: Alexander N. Abramov, Nadezhda K Kulagina, Maria P. Khaidina, Olga V. Postnikova

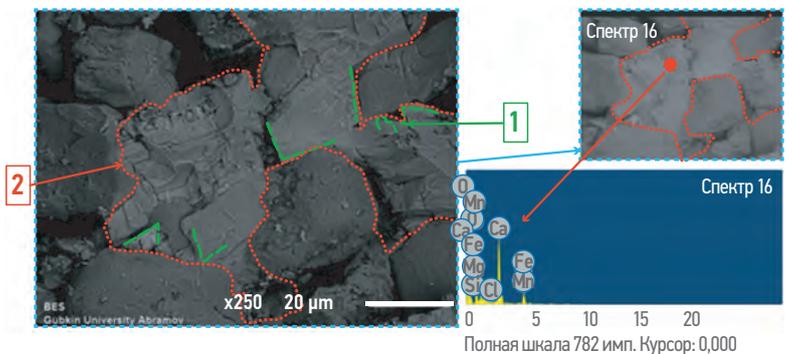


Рис. 3. Новообразованные аутигенные кристаллы анкерита. 1 — гипидиоморфные кристаллы анкерита с правильными кристаллографическими очертаниями, 2 — анкеритовое заполнение межзернового пространства. Составлено авторами: А.Н. Абрамов, Н.К. Кулагина, М.П. Хайдина, О.В. Постникова
Fig. 3. New formed authigenous ankerite crystals. 1 — Ankerites hypidiomorphic crystals with regular crystallographic outlines, 2 — ankerite filling of the intergranular space. Compiled by the authors: Alexander N. Abramov, Nadezhda K. Kulagina, Maria P. Khaidina, Olga V. Postnikova

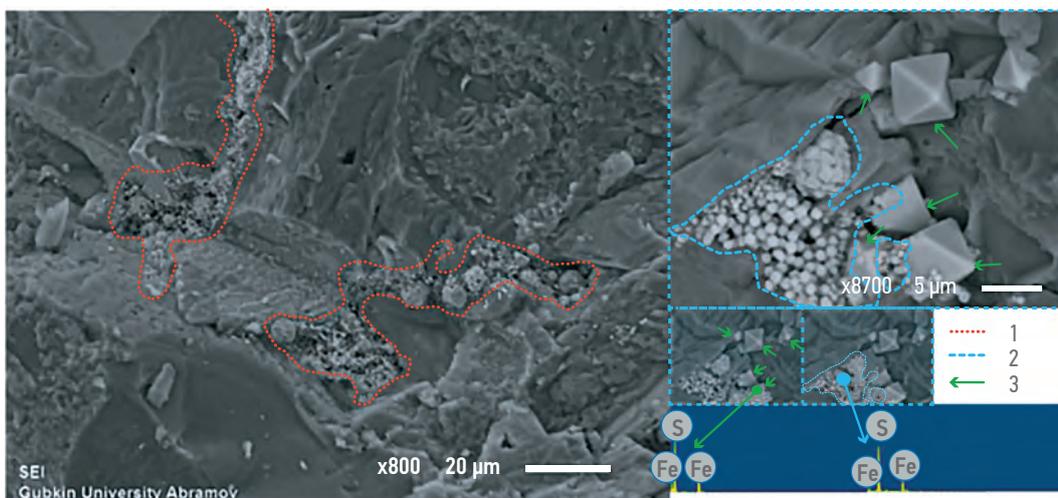


Рис. 4. Фрамбоиды пирита, сформированные сульфатредуцирующими бактериями. 1 — скопление фрамбоидов и октаэдров пирита в пустотном пространстве, 2 — фрамбоиды пирита биогенного происхождения, 3 — октаэдры пирита минерального происхождения. Составлено авторами: А.Н. Абрамов, Н.К. Кулагина, М.П. Хайдина, О.В. Постникова

Fig. 4. Pyrite framboids formed by sulfate-reducing bacteria. 1 — pyrite accumulation framboids and octahedra in the porous space, 2 — pyrite framboids of biogenic origin, 3 — pyrite octahedra of mineral origin. Compiled by the authors: Alexander N. Abramov, Nadezhda K. Kulagina, Maria P. Khaidina, Olga V. Postnikova

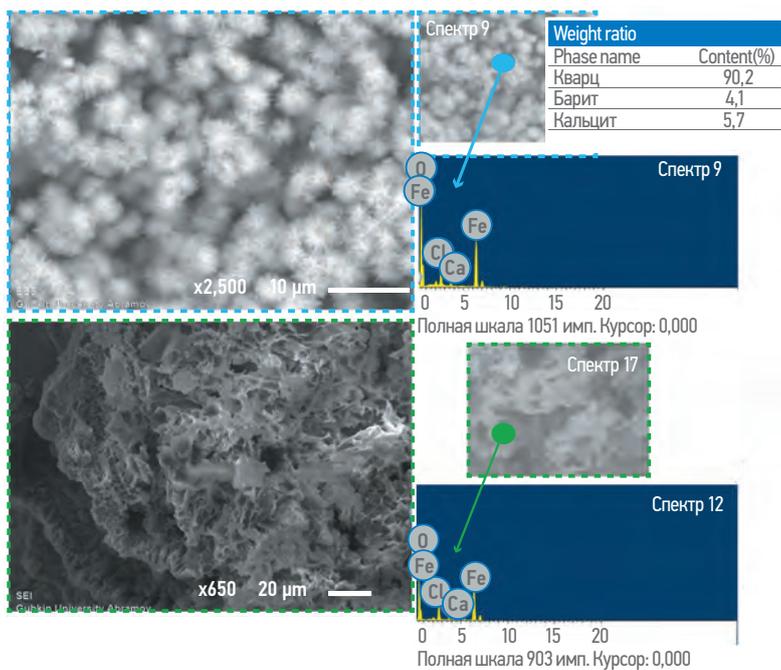


Рис. 5. Бактериальные коллоидные формы оксида железа. Составлено авторами: А.Н. Абрамов, Н.К. Кулагина, М.П. Хайдина, О.В. Постникова
Fig. 5. Bacterial colloidal forms of iron oxide. Compiled by the authors: Alexander N. Abramov, Nadezhda K. Kulagina, Maria P. Khaidina, Olga V. Postnikova

что данные клетки являются представителями сульфатредуцирующих бактерий, способных формировать фрамбоиды и нокки пиритового состава, которые представлены на **рис. 4**. Для подтверждения жизнеспособности и присутствия в образцах клеток микроорганизмов дополнительно проведен высев образцов на твердую питательную среду. Применение методов СЭМ в режиме естественной среды (ESEM) — исследование образца, показало также наличие бактериальных клеток на частицах образца (**рис. 6Б**).

Ещё одной из существенных форм вторичного преобразования пород является четвертый тип — это выщелачивание (**рис. 7**). Выделяется несколько стадий этого процесса. Последствия видоизменения пород на ранних стадиях выявлены на обломочных зернах, слагающих основной карнас породы, а результат более поздних стадий связан с аутигенными минеральными образованиями в поровом пространстве. С высокой долей вероятности можно утверждать, что процессы выщелачивания связаны с агрессивными техногенными растворами, которые закачивают в скважины. Выщелачиванием затронуты зёрна и кристаллы кварца, полевых шпатов и анкерита.

Как упоминалось выше, на минералообразование и геохимические реакции в пустотном пространстве сильное влияние оказывает деятельность микроорганизмов. Их активность может зависеть от состава газа и сопутствующих компонентов. Поскольку ПХГ могут использоваться не только для хранения попутного газа нефтегазовых пластов, но и для других видов газа, H_2 , CO_2 и биогаз (CH_4), можно ожидать в объеме ПХГ бурного развития бактериальных процессов, связанных с возникновением бактериальных биоценозов. Попадая в коллектор, эти газы метаболизируются метаногенами и гомоацетогенами, населяющими ПХГ, что и вызывает сильное бактериальное минералообразование. С такой ситуацией уже сталкиваются во многих зарубежных странах, где внедрена практика использования ПХГ для хранения биогаза.

Очевидно, что в ПХГ, в которые закачивается в больших количествах биогаз, может проявляться сильная активность микробиоты ПХГ, что приводит к изменению состава исходного

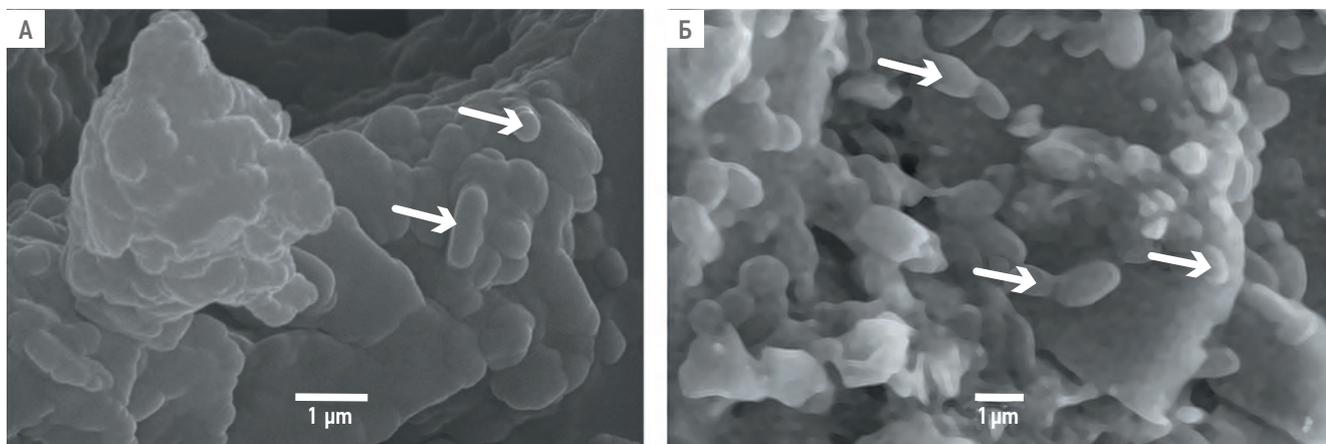


Рис. 6. Бактериальные клетки до (А) и после (Б) посева на твердую питательную среду. Стрелками указаны клетки бактерий. Составлено авторами: Л.Э. Алескерова, К.А. Шибзухова, А.М. Неугодов
Fig. 6. Bacterial cells before (A) and after (B) sowing on a solid breeding ground. The arrows indicate bacterial cells. Compiled by the authors: Leila E. Aleskerova, Karina A. Shibzuhova, Artyom M. Neugodov

микробного сообщества в пустотном пространстве пород-коллекторов из-за наличия в биогазе покоящихся бактериальных клеток. В результате активизируются биохимические процессы, несвойственные для природной экосистемы, что приводит к изменению физиологической направленности процессов и, в конечном итоге, к изменению состава газа и коррозии оборудования. Таким образом, объем и свойства фильтрационно-емкостного пространства пород-коллекторов ПХГ во многом определяются широким комплексом геологических, биогенных, биохеомогенных и технологических факторов.

Список литературы

1. Астафьева М.М., Жегалло Е.А., Ривкина Е.М., Самылина О.С. и др. Бактериальная палеонтология. — М.: ПИН РАН, 2021.
2. Berner R.A., De Leeuw J.W., Spiro B., Murchison D.G., Eglinton G. Sulphate Reduction, Organic Matter Decomposition and Pyrite Formation [and Discussion]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 1985, vol. 315, p. 25.

References

1. Astafyeva M.M., Zhegallo E.A., Rivkina E.M., Samylina O.S. et al. Bacterial paleontology. Moscow: PIN RAS, 2021. (In Russ.)
2. Berner R.A., De Leeuw J.W., Spiro B., Murchison D.G., Eglinton G. Sulphate Reduction, Organic Matter Decomposition and Pyrite Formation [and Discussion]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 1985, vol. 315, p. 25.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Н.К. Кулагина — разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, приняла активное участие в исследованиях, связанных с литологической и бактериальной составляющей работ, изучала состав работ до и после обработки, формирование выводов, согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

О.В. Постникова — разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, приняла активное участие в исследованиях, связанных с литологической и бактериальной составляющей работ, формирование выводов, изучала состав работ до и после обработки.

М.П. Хайдина — руководитель научной темы, постановка задач исследований, формирование выводов, текста статьи.

А.Н. Абрамов — реализовал съемку на растровом электронном микроскопе, производил отбор образцов, исследовал минеральную составляющую матрикса пород, а также структуру пустотного пространства.

Л.Э. Алескерова — приняла активное участие в организации и проведении исследований, оказала экспертную поддержку в области микробиологии и сканирующей электронной микроскопии; разработала концепцию статьи. Окончательно утвердила публикуемую версию статьи.

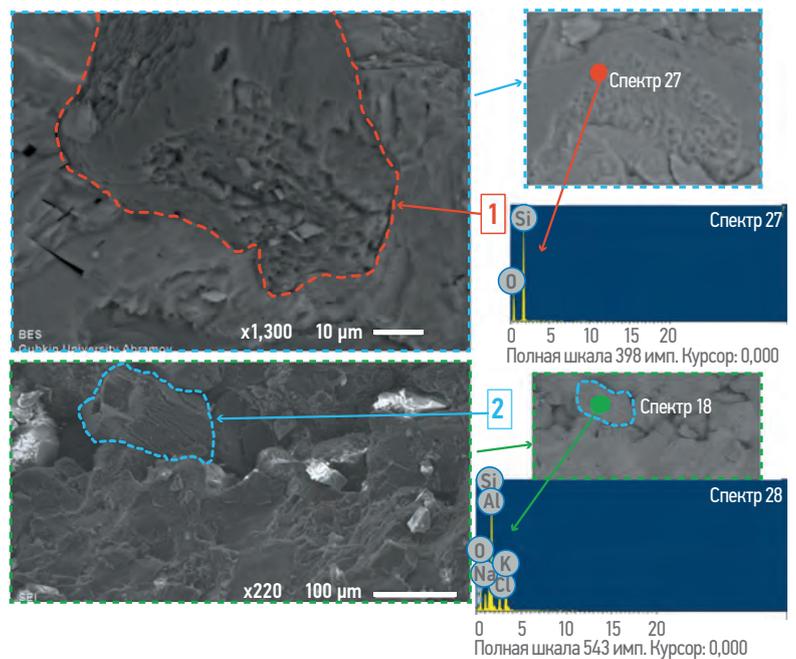


Рис. 7. Следы выщелачивания по кристаллам кварца (1) и полевых шпатов (2). Составлено авторами: А.Н. Абрамов, Н.К. Кулагина, М.П. Хайдина, О.В. Постникова
Fig. 7. Leach traces on quartz crystals (1) and feldspars (2). Compiled by the authors: Alexander N. Abramov, Nadezhda K Kulagina, Maria P. Khaidina, Olga V. Postnikova

К.А. Шибзухова — приняла активное участие в исследованиях и оказала экспертную поддержку в области сканирующей электронной микроскопии. Окончательно утвердила публикуемую версию статьи.

А.М. Неугодов — принял активное участие в организации и координации исследований с применением метода сканирующей электронной микроскопии.

Д.А. Гурбанпесов — участие в исследованиях, сбор обзорной информации, подготовка материалов к печати.

Karina A. Shibzukhova — actively participated in the research and provided expert support in the field of scanning electron microscopy. Final approval of the published version of the article.

Artyom M. Neugodov — took an active part in the organisation and coordination of research using the scanning electron microscopy method.

Daniil A. Gurbannepesov — participation in research, collection of overview information, preparation of materials for printing.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Надежда Константиновна Кулагина* — кандидат геолого-минералогических наук., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина 119991, Россия, г. Москва, Ленинский пр., д. 65, корпус 1.
e-mail: kulagina.n@gubkin.ru
тел.: +7 (499) 507-85-82
SPIN-код: 4422-2747

Мария Павловна Хайдина — кандидат технических наук, доцент, доцент РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8823-0921>
SPIN-код: 3351-9497

Ольга Васильевна Постникова — доктор геолого-минералогических наук., доцент, декан факультета геологии и геофизики нефти и газа, профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
SPIN-код: 1920-3080
Scopus ID: 6507338873
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1331-0656>

Александр Николаевич Абрамов — ассистент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
SPIN-код: 5644-8301
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1331-0656>

Лейла Эльшадовна Алескерова — научный сотрудник, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет, кафедра биоинженерии
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3673-7226>
Scopus ID: 56345736100

Карина Ахмедовна Шибзухова — научный сотрудник, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет, кафедра биоинженерии
SPIN-код: 6827-6689
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9065-4715>
Scopus ID: 57195809076

Артем Михайлович Неугодов — инженер-лаборант 1 категории, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет, кафедра биоинженерии

Даниил Александрович Гурбанпесов — аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Nadezhda K. Kulagina* — Cand. Sci. (Geol.-Min.), docent, Gubkin Russian State University of Oil and Gas 65 Leninsky Prospekt, building 1, 119991, Moscow, Russia.
e-mail: kulagina.n@gubkin.ru
tel.: +7 (499) 507-85-82
SPIN-code: 4422-2747

Maria P. Khaidina — Cand. Sci. (Tech.), title of docent, docent of Gubkin Russian State University of Oil and Gas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8823-0921>
SPIN-code: 3351-9497

Olga V. Postnikova — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Associate Professor, Faculty of Geology and Geophysics of Oil and Gas dean, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas
SPIN-code: 1920-3080
Scopus ID: 6507338873
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1331-0656>

Alexander N. Abramov — Assistant, Gubkin Russian State University of Oil and Gas
SPIN-code: 5644-8301
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1331-0656>

Leila E. Aleskerova — Researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Department of Bioengineering.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3673-7226>
Scopus ID: 56345736100

Karina A. Shibzukhova — Researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Department of Bioengineering.
SPIN-code: 6827-6689
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9065-4715>
Scopus ID: 57195809076

Artyom M. Neugodov — Laboratory engineer of the 1st category, Moscow State University named after M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Department of Bioengineering.

Daniil A. Gurbannepesov — Postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author