

Научная статья

УДК 550.7:550.4:546.65

doi:10.52349/0869-7892_2026_106_79-92

**Исследование влияния биогенного фактора
на аккумуляцию редкоземельных элементов
в породах томторского комплекса (Якутия)****С. М. Жмодик¹, Е. А. Жегалло^{2,3}, Е. В. Лазарева¹,
Е. А. Сапрыкин⁴✉, М. И. Капралов⁴, Н. В. Грубова³,
А. Ю. Розанов¹⁻⁵**¹ Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия² Институт биологии развития им. Н. К. Кольцова РАН,
Москва, Россия³ Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка
Российской академии наук, Москва, Россия⁴ Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия,
netherilpayments@gmail.com✉⁵ Национальный парк «Ленские столбы»,
Покровск, Россия

Ключевые слова: Томторское REE-Nb месторождение, легкие лантаноиды, СЭМ-ЭДС, бактериальная палеонтология, поиск рудоносных пород

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-63-10017. Часть каменного материала собрана в период экспедиционных работ 2013 г. в рамках государственного задания Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (№ 122041400193-7) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Жмодик С. М., Жегалло Е. А., Лазарева Е. В., Сапрыкин Е. А., Капралов М. И., Грубова Н. В., Розанов А. Ю. Исследование влияния биогенного фактора на аккумуляцию редкоземельных элементов в породах томторского комплекса (Якутия) // Региональная геология и металлогения. 2026. Т. 33, № 2. С. 79–92. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2026_106_79-92

Аннотация. Проведено исследование образца пород и руд уникального Томторского редкоземельно-ниобиевого месторождения методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Ранее высказывались обоснованные предположения, что высокие содержания редкоземельных элементов в рудах Томторского месторождения сформировались в результате жизнедеятельности микроорганизмов и специфических физико-химических условий их обитания. Для подтверждения данной гипотезы проведено бактериально-палеонтологическое исследование породы из гётитового горизонта (инт. 58,0–58,1 м) скважины Г2 (участок Буранный). В результате в породе обнаружены скопления микрофоссильных остатков различных морфологий, концентрирующих редкоземельные элементы. Приведены описания морфологии обнаруженных микрофоссилий, определены как прокариотические, так и эукариотические формы. Исследование показало, что в марганец-железно-оксидной породе концентрирование редкоземельных элементов происходит исключительно в микрофоссильных остатках с замещением органического вещества минералами группы плюмбогуммита при фоссилизации. В изученной породе установлено, что микроорганизмы аккумулировали прежде всего церий и лантан, в меньшей степени — празеодим и неодим, причем качественный состав редкоземельных элементов связан с морфологическим типом фоссилизированных микроорганизмов.



Original article

UDC 550.7:550.4:546.65

doi:10.52349/0869-7892_2026_106_79-92

The biogenic factor impact on rare earth element accumulation in the Tomtor complex rocks (Yakutia)

S. M. Zhmodik¹, E. A. Zhegallo^{2, 3}, E. V. Lazareva¹,
E. A. Saprykin⁴✉, M. I. Kapralov⁴, N. V. Grubova³,
A. Yu. Rozanov¹⁻⁵

¹ V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Koltzov Institute of Developmental Biology
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Borissiak Paleontological Institute
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia,
netherilpayments@gmail.com✉

⁵ Lena Pillars National Park, Pokrovsk, Russia

Keywords: Tomtor REE-Nb ore deposit, light lanthanides, SEM-EDX, bacterial paleontology, ore-bearing rock prospecting

Acknowledgments: the Russian Science Foundation supported the study (grant no. 23-63-10017). Some rock material was collected during expeditions of 2013 (state geological study no. 122041400193-7, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences) supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

For citation: Zhmodik S. M., Zhegallo E. A., Lazareva E. V., Saprykin E. A., Kapralov M. I., Grubova N. V., Rozanov A. Yu. (2026). The biogenic factor impact on rare earth element accumulation in the Tomtor complex rocks (Yakutia). *Regional Geology and Metallogeny*, 33(2), 79–92. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2026_106_79-92

Abstract. The authors analyzed a sample of an ore rock from the unique Tomtor REE-Nb ore deposit, using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. A high rare earth element (REE) potential of the rocks should have been previously related to microorganisms' activity and specific physical and chemical conditions of their habitat. To confirm the hypothesis, the authors conducted a bacterial and paleontological study of the goethite horizon (int. 58.0–58.1 m) rock sample from the borehole Г2 (Buranny site). The findings revealed microfossil remains of various morphologies in the rock sample, which correspond with rare earth element accumulation zones. The results described morphology of the discovered microfossils and identified both prokaryotic and eukaryotic forms. The study demonstrated that in the manganese iron oxide rock rare earth element accumulation occurs exclusively in microfossil remains, with the fossilization process involving replacement of the organic matter with plumbogummite-group minerals. It was determined that, during their lifetime, microorganisms in the studied sample primarily accumulated cerium and lanthanum, and to a lesser extent, praseodymium and neodymium, provided that the qualitative composition of rare earth elements relates to the fossilized microorganisms' morphological type.

ВВЕДЕНИЕ

Томторский комплекс (массив) ультраосновных щелочных пород карбонатитов — крупнейший среди известных карбонатитовых массивов (около 250 км²). Он уникален как по запасам, так и по концентрациям скандия, иттрия, ниобия, редкоземельных элементов (пироклор-монацит-алюмофосфатных руд), а также железа, титана, ванадия, фосфора, комплексных руд. Массив расположен в Арктической зоне Республики Саха (Якутия), восточнее Анабарского поднятия, на пересечении осевой зоны Уджинского поднятия и Молодо-Поппайского вулканоплутонического пояса. Томторский комплекс имеет кольцевую структуру и сложен в периферической зоне биотитовыми, биотит-пироксеновыми и нефелиновыми сиенитами, ийолит-мельтейгитами с трубками и дайками лампрофиров, а в центральной части — микроклин-слюдистыми породами и карбонатитами, среди которых выделяются «рудные» и «безрудные» разновидности. Уникально богатые Sc–Y–Nb–PЗЭ тонкослоистые руды (так называемый «верхний рудный горизонт») представляют собой стратифицированные

пластовые тела, залегающие, как считается, во впадинах на коре выветривания по карбонатным породам, на измененных карбонатитах или породах сидеритового горизонта (Этин и др., 1990; Толстов и др., 1999; Толстов и др., 2020). Для этих руд характерна высокая дисперсность минералов и агрегатов — до 90 % материала сложено частицами менее 10 мкм. Модель формирования (генезис) богатых руд Томторского месторождения остается дискуссионной: главную роль в ней отводят различным процессам — магматическому, осадочному, гидротермально-осадочному, вулканогенно-осадочному или биогенно-осадочному. Вопрос вторичного преобразования руд также окончательно не решен: либо формирование происходило в окислительной обстановке, либо под действием восстановленных болотных растворов, просачивающихся из залегающих выше угленосных отложений. Авторы полагают, что рудоносные породы Томторского месторождения сформировались в результате гидротермально-осадочного процесса в условиях биогенно обусловленного концентрирования редкоземельных элементов (далее — РЗЭ) (Лазарева и др., 2015).

К настоящему времени опубликован ряд исследований, посвященных влиянию биогенного фактора на аккумуляцию РЗЭ в породах томторского комплекса. В статьях приведены: данные о минералогическо-геохимических особенностях пород и руд; данные об изотопном составе ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) карбонатов, которые указывают на важную роль биогенного фактора в формировании минералов томторского комплекса; описана морфология микрофоссильных остатков (включающих метаногенные, метанотрофные и фототрофные бактерии, протеобактерии и цианобактерии), обнаруженных в исследованных породах; показана связь между рудоносностью пород и процессами жизнедеятельности микроорганизмов (Добрецов и др., 2021; Жегалло и др., 2021; Жмур и др., 1994; Пономарчук и др., 2020; Moroz et al., 2021; Zhmodik et al., 2019, 2024a, 2024b).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наиболее полный разрез, характеризующий разнообразие и последовательность изменений пород томторского комплекса, вскрыт скв. 6151, пробуренной в южной части участка Буранный. Разрез представлен в следующем виде (снизу вверх): кальцитовые «рудные» карбонатиты — биотит-микроклиновые породы — хлорит-франколитовые образования — Mn-Fe-гидроксидный (гётитовый) горизонт — нижний рудный горизонт — сидеритовый горизонт (43 м) — верхний рудный горизонт (пироксено-монацит-алюмофосфатные руды), которые перекрываются континентальными угленосными отложениями пермского возраста. Франколитовый, гётитовый, сидеритовый и верхний рудный горизонты традиционно рассматриваются как профиль выветривания (Лапин и др., 2011).

Методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС-анализ) исследован образец породы (Т-224-23) из гётитового горизонта, вскрытого скв. Г2, пробуренной в 1995 г. в центральной части северного фланга участка Буранный массива Томтор (рис. 1). Порода представлена рыхлым материалом бурого-коричневого цвета с высокими содержаниями TiO_2 , Al_2O_3 , FeO_{tot} , MnO , P_2O_5 , BaO (табл. 1). Судя по содержаниям Nb_2O_5 (0,26 мас. %) и РЗЭ (1,18 мас. %; по данным спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и атомно-адсорбционной спектроскопии (ИСП-ААС) — 1,78 мас. %), образец можно отнести

к бедным гётитовым ниобий-редкоземельным рудам. Минеральный состав породы представлен гётитом, гидроксидами марганца, а также подчиненными количествами каолинита, Nb-содержащего рутила, минералов группы плюмбогуммита (Bayliss et al., 2010) (горсейксит, гоэцит, флоренсит, крадаллит) и реликтов Mn-содержащего сидерита.

Препараты (сколы породы) были изучены методом сканирующей электронной микроскопии на приборе Tescan VEGA 3 с термоэмиссионным катодом в Объединенном институте ядерных исследований. Использовалась система ЭДС-анализа Oxford Instruments plc с полупроводниковым детектором рентгеновского излучения X-Act и программным обеспечением Aztec 3.2 SP1. Следует учитывать, что из-за рельефности и неомогенности поверхности образцов удалось выполнить лишь качественный и приближенно-количественный анализ химического состава минералов и фоссилизированных образований, поэтому суммы весовых содержаний элементов в таблицах приведены в пересчете на 100 %. Исследовали свежие внутренние сколы породы, предварительно напыленные золотом (8,2 нм), что позволяло с достаточно высоким качеством выявлять распределения и содержания редкоземельных элементов. В первом приближении зона генерации рентгеновского излучения (от 0,1 до 5 мкм) зависит от плотности материала образца и ускоряющего напряжения. Поэтому в некоторых случаях для уточнения качественного состава мелких объектов ускоряющее напряжение варьировалось в диапазоне от 10 до 30 кВ.

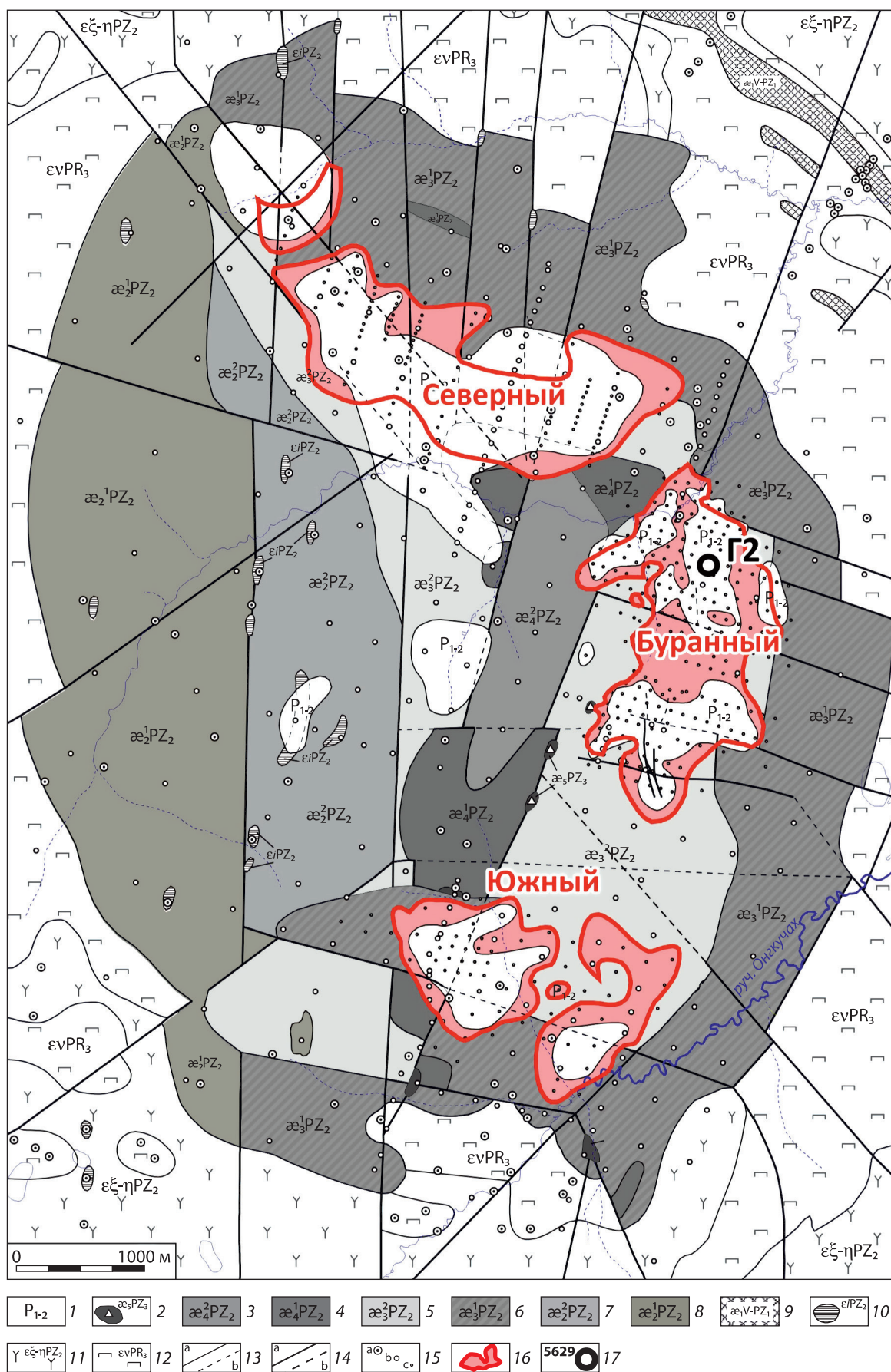
Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) химического состава породы выполнен на спектрометре ARL-9900XP (ThermoFisher Scientific) с использованием программы QuantAS (ЦКП ИГМ СО РАН, аналитик Н. Г. Карманова). Препараты для анализа готовили путем сплавления пробы с флюсом на основе смеси тетрабората и метабората лития в соотношении 1 : 9. Пределы обнаружения элементов составили 0,001–0,1 мас. %. Содержание элементов от К до U определяли методом РФА-СИ, реализованным на станции элементного анализа ВЭПП-3 (режим ускорителя 2 ГэВ, ток ускоренных электронов 100 мА) в Сибирском центре синхротронного излучения ИЯФ СО РАН (аналитик Ю. П. Колмогоров). Содержания РЗЭ, Nb и сопутствующих элементов определяли по специально разработанной методике на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой IRIS Advantage (Thermo Jarrell

Таблица 1

Химический состав образца Т-224-23 из гётитового горизонта скважины Г2 томторского комплекса

Table 1. Chemical composition of the goethite horizon sample T-224-23 from the Tomtor complex borehole Г2

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO_{tot}	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	nnn
4,36	2,93	11,44	35,38	3,66	0,57	2,86	0,00	0,44	7,00	24,11
BaO	V_2O_5	NiO	Nb_2O_5	CeO_2	SrO	ZnO	La_2O_3	Y_2O_3	Zr_2O	Pr_2O_3
3,81	0,04	0,05	0,26	0,58	1,41	0,27	0,43	0,11	0,01	0,06



Ash, США) в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Сарыг-оол и др., 2020). Калибровку осуществляли с применением водных растворов элементов с аттестованными содержаниями. Относительная погрешность анализа не превышает 15 %. Контроль точности определения РЗЭ методом ИСП-АЭС проводили с использованием отраслевых стандартных образцов ОСО 250-91 (НФС-23, руда редкоземельная, ВИМС, Россия), ОСО 755-16 (VIMS039RzO, руда ниобий-редкоземельная, ВИМС, Россия), ОСО 758-16 (VIMS042RzO, руда ниобий-редкоземельная, ВИМС, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Главная цель исследования — соотнесение участков, обогащенных редкоземельными элементами, и скоплений микрофоссильных остатков в РЗЭ-ниобиевой руде гётитового горизонта томторского комплекса.

Данные ЭДС-анализа свидетельствуют, что основным минералом исследованной породы является гидрооксид железа (гётит); присутствуют гидроксиды марганца, каолинит, ниобийсодержащий рутил (Nb-TiO_2), минералы (твердые растворы) группы плюмбогуммита (Bayliss et al., 2010) (горсейксит, голяцит, флоренсит, крадаллит), а также реликты, в большинстве случаев измененные, Mn-содержащего сидерита, сфалерита. В породе часто встречаются промежуточные разновидности алюмофосфатов группы плюмбогуммита (горсейксит-голяцит-флоренсит-крадаллит), имеющие бактериоморфный вид.

Бактериальные микрофоссильные остатки (рис. 2–7) морфологически интерпретируются как бациллоподобные формы (длиной 1–5 мкм) (рис. 2), на которые приходится основная масса находок (обнаруживаются в большом количестве в микротрещинах); коккоидные формы (рис. 3, табл. 2, 3) (~3–5 мкм) — как одиночные, так и в группах; чехлы (рис. 4), мешковидные формы (рис. 5, табл. 4) с бугорками и отростками. Часть минеральной матрицы покрыта фоссилизированным гликокаликсом (рис. 6, табл. 3). Обнаружены также малые (~0,5 мкм) бациллоподобные формы с более высоким содержанием РЗЭ (рис. 7, табл. 5).

По результатам ЭДС-анализа можно заключить, что места аккумуляции РЗЭ совпадают с зонами обнаружения морфологически распознаваемых микрофоссильных остатков и гликокаликса (за редким исключением). Минеральная матрица, вмещающая микрофоссилии, представлена сидеритом, Mn-содержащим сидеритом и гётитом; значимых содержаний РЗЭ в ней не обнаружено (или их концентрации находятся ниже предела обнаружения). Во всех установленных микрофоссилиях в процессе фоссилизации органика была замещена минералами группы плюмбогуммита.

Детектируемые РЗЭ представлены лантаноидами: Ce, La, Nd, Pr. Остальные РЗЭ в исследованном образце не выявлены. Относительно качественного содержания РЗЭ можно сделать вывод, что церий содержится во всех обнаруженных микрофоссилиях; зачастую ему сопутствует лантан (впрочем, возможно, в тех случаях, где он не обнаружен, это обусловлено недостаточной чувствительностью анализа). Неодим и празеодим встречаются значительно реже.

Рис. 1. Схематическая геологическая карта доюрских образований центральной части Томторского месторождения

1 — континентальные осадочные пермские отложения; **2** — карбонатитовые брекчии; **3** — карбонатиты редкометалльные; **4** — анкерит-шамозитовые породы; **5** — карбонатиты фосфорно-редкометалльные (полиминеральные); **6** — апатит-микроклин-слюдистые породы; **7** — карбонатиты безрудные (кальцитовые и доломит-кальцитовые); **8** — кальцит-микроклин-слюдистые породы; **9** — камафориты; **10** — щелочно-ультраосновные породы альнеит-тингвайтовой серии (альнеиты, пикриты, тингвайты и др.); **11** — щелочные и нефелиновые сиениты; **12** — фойдолиты — нефелин-пироксенитовые породы ряда якупирангит-уртит; **13** — геологические границы и **14** — тектонические нарушения: *a* — достоверные, *b* — предполагаемые и погребенные; **15** — пробуренные скважины: *a* — до 1985 г., *b* — Эбеляхской геологоразведочной партией на поисково-оценочной стадии в 1985–1990 гг., *c* — на стадии разведки по объекту Буранный в 1991–1994 гг.; **16** — контуры участков Северный, Буранный и Южный; **17** — расположение скв. Г2

Источник: по Толстову и др. (1998)*

Fig. 1. Schematic geological map of the Pre-Jurassic formations in the central part of the Tomtor ore deposit

1 — Permian continental sedimentary deposits; **2** — carbonatite breccias; **3** — rare metal carbonatites; **4** — ankerite-chamosite rocks; **5** — phosphorus rare metal (polymetal) carbonatites; **6** — apatite-microcline-micaceous rocks; **7** — barren carbonatites (calcite and dolomite-calcite); **8** — calcite-microcline-micaceous rocks; **9** — kamaphorites; **10** — alkaline-ultramafic rocks of the alnöite-tinguaitite series (alnöite, picrite, tinguaitite, etc.); **11** — alkaline and nepheline syenites; **12** — foidolites — nepheline-pyroxenite rocks of the jacupirangite-urtite series; **13** — geological boundaries and **14** — tectonic faults: *a* — established, *b* — inferred and buried; **15** — boreholes drilled: *a* — before 1985, *b* — Ebelyakh geological exploration party at the appraisal stage in 1985–1990, *c* — at the exploration stage of the Buranny object in 1991–1994; **16** — outlines of the Severny, Buranny, and Yuzhny sites; **17** — borehole Г2 location

Source: from Tolstov et al. (1998)**

* Толстов А. В., Цыбульская Т. Е., Гунин А. П. Отчет о результатах предварительной разведки богатых руд участка Буранный редкоземельного месторождения Томтор за 1990–1997 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.1998 г., п. Айхал, 1998 г. // ГУП «Сахагеоинформ». № 19329.

** Tolstov A. V., Tsybul'skaya T. E., Gunin A. P. (1998). Report on the preliminary rich ore exploration results at the Buranny site, the Tomtor rare earth deposit for 1990–1997, with reserves calculated as of 01.01.1998, Aykhal settlement. GUP "Sakhageoinform". No. 19329.

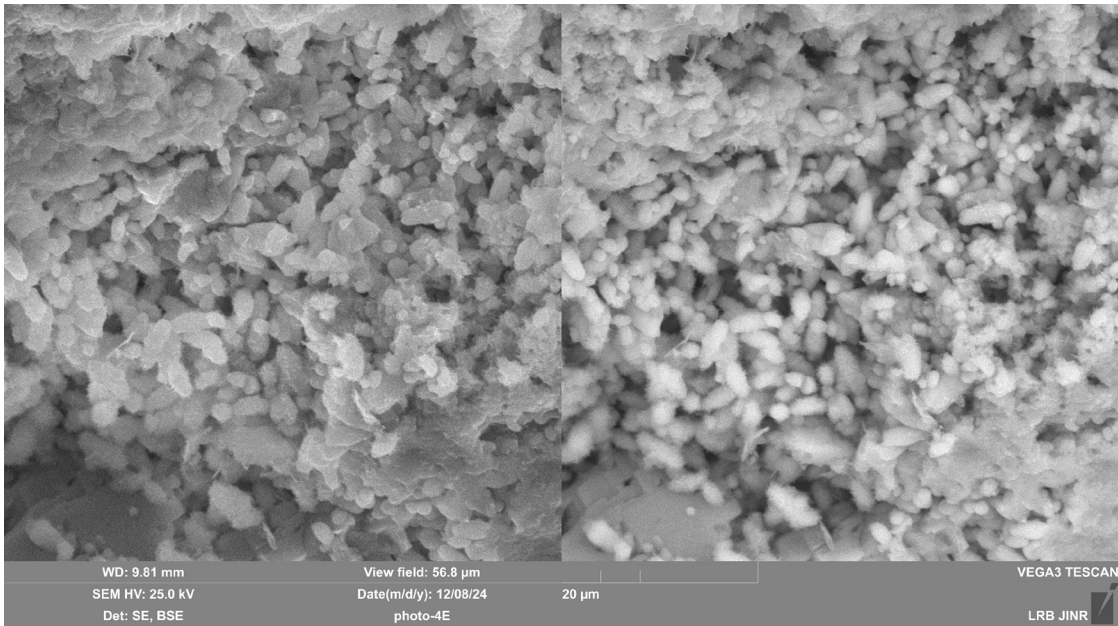


Рис. 2. Множественные бациллоподобные формы (замещение монацитом)

Изображение в SE (слева) и BSE (справа) детекторах. SE — детекторы вторичных электронов, BSE — детекторы обратно рассеянных электронов

Fig. 2. Multiple bacilliforms (replacement with monazite)

Image in SE (left) and BSE (right) detectors. SE — secondary electron detectors, BSE — backscattered electron detectors

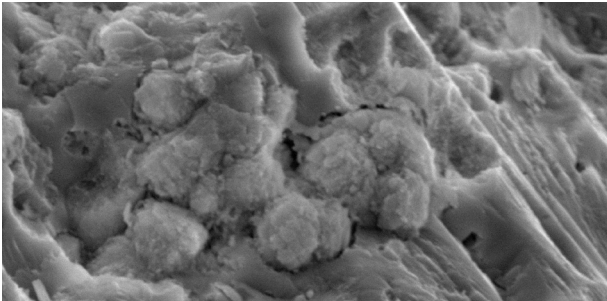
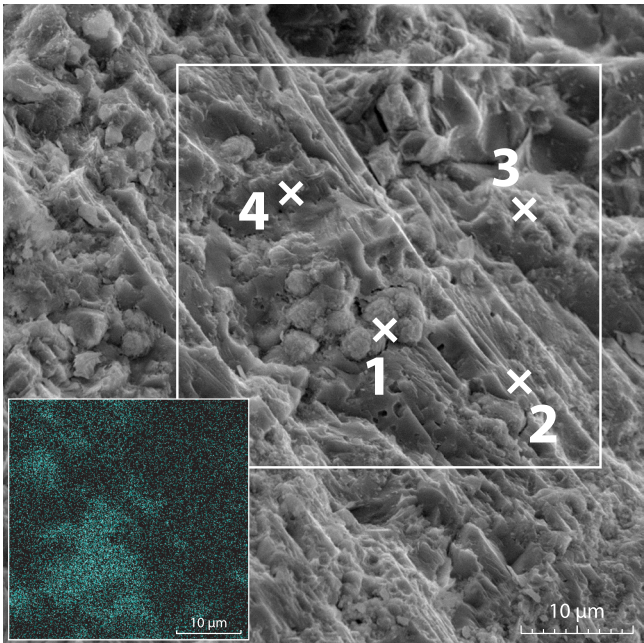


Рис. 3. Крупные коккоидные формы с бугристой поверхностью (возможно, слипшиеся малые коккоидные/бациллоподобные формы), замещенные минералами (твердыми растворами) группы плюмбогуммита (горсейксит-гояцит-флоренсит) расположенные на измененных участках сидерита. Рядом — карта распределения церия

Fig. 3. Large coccoid forms with a tuberosity surface (possibly adherent small coccoid/bacilliforms), replaced with plumbogummite-group minerals (solid solutions) (gorceixite-goyazite-florencite) located on altered areas of siderite. Ce-distribution map is attached

Таблица 2

Химический состав (мас. %) коккоидных форм (спектр 1) и окружающей породы (спектры 2–4) для рис. 3

Table 2. Chemical composition (wt. %) of coccoid forms (spectrum 1) and surrounding rock (spectra 2–4) for fig. 3

Номер спектра	C	O	Na	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr	Ba	La	Ce	Nd
1		59,4	0,48	13,9		9,08		0,88		0,36	3,91		2,95	5,71	0,91	1,91	0,45
2	15,2	56,2		0,36		0,26				0,49	27,5						
3	16,9	58,7		0,73	1,09		0,19	0,1	0,52	0,54	21,3						
4	17	58,4		0,53	0,67	0,18	0,11		0,12	0,54	22,3	0,18					

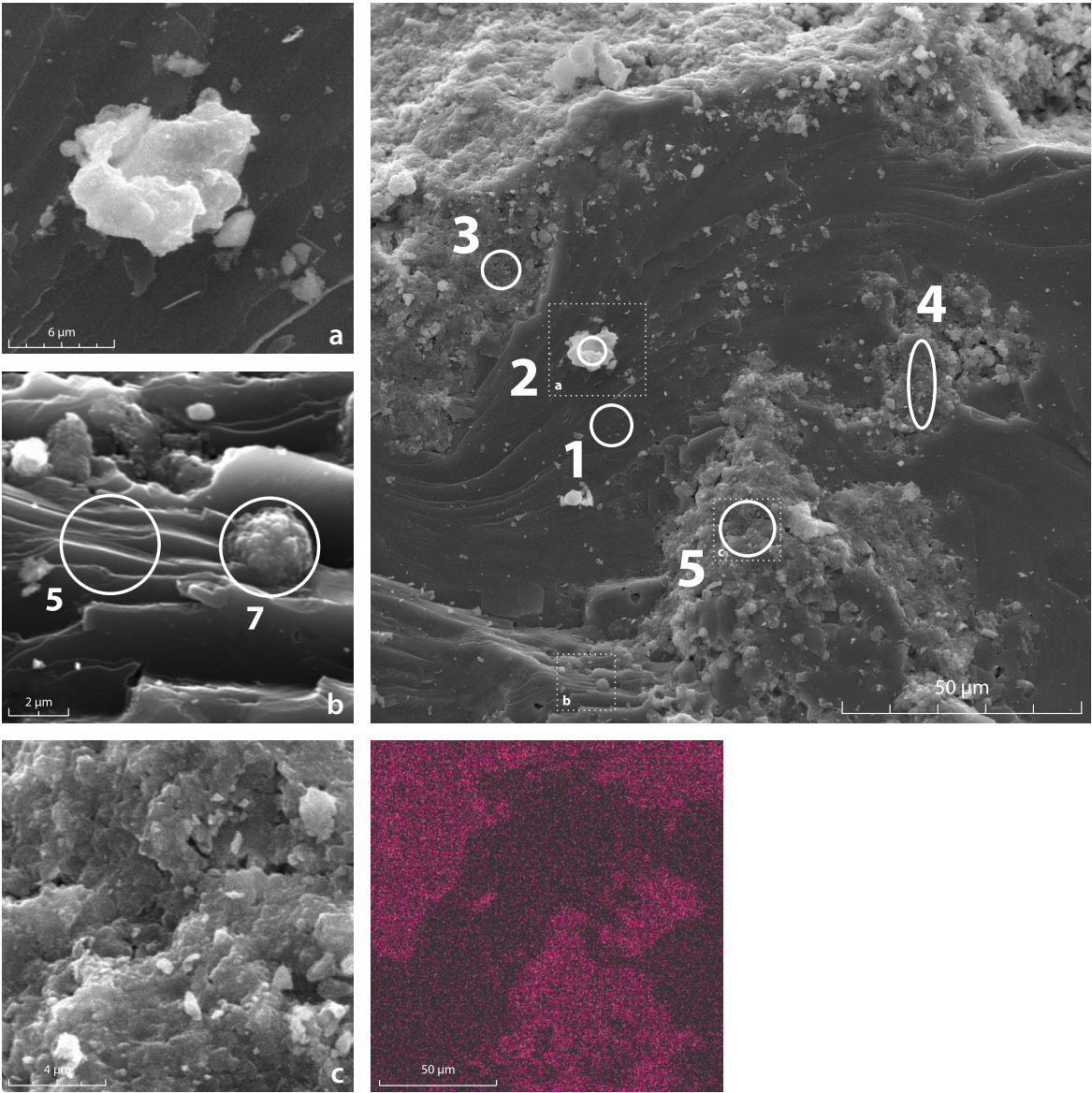


Рис. 4. Микрофоссилии различных морфологических типов

Чехол (a), сферическая форма с бугорчатой поверхностью (b), гликокаликс (c), замещенные минералами группы плюмбогуммита (твердые растворы): крандаллит–горсейксит–гойяцит–флоренсит, на измененной поверхности сидерита. Номерами отмечены соответствующие спектры из табл. 3. Рядом — карта распределения церия

Fig. 4. Microfossils of various morphological types

Sheath (a), spherical shape with a tuberosity surface (b), glycocalyx (c), replaced with the plumbogummite-group minerals (solid solutions): crandallite-gorceixite-goyazite-florencite located on altered areas of siderite. The numbers correspond to the spectra in table 3. Ce-distribution map is attached

Таблица 3

Химический состав (мас. %) выделенных областей для рис. 4
Table 3. Chemical composition (wt. %) of the selected areas for fig. 4

Номер спектра	C	O	Al	Si	P	Ca	Ti	Mn	Fe	Sr	Ba	La	Ce	Nd
1	12,1	45,4	0,4		0,3			0,9	40,9					
2	11,8	47,2	6,26	0,8	3,43	0,5	1,8	0,8	23,3	1,4	2,1		0,6	
3		54,2	16,6		12,2	3,3			1,62	3,6	2,2	2,2	3	1,2
4		53,9	15,6		11,2	2,6		0,3	4,54	3,4	3	1,9	2,6	1
5		58,7	15,8		11,3	2,6			1,52	4,3	2,7	0,9	1,7	0,6
6	12,3	54,2	3,64		2,05	0,3		0,7	25,1	0,4	1,4			
7		55,5	11,5		7,46	0,8		0,4	15,9	1,8	5,9		0,9	

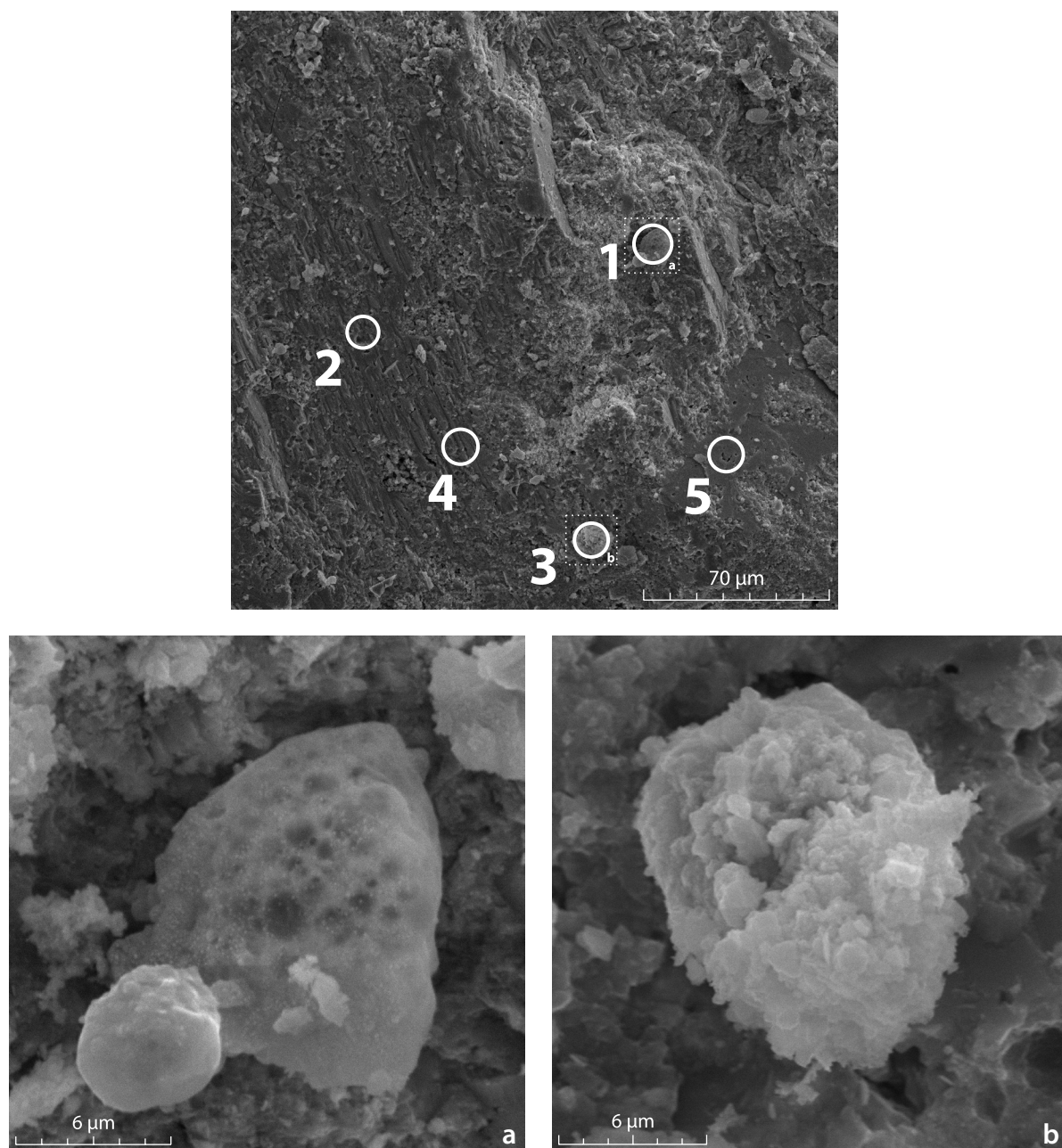


Рис. 5. Бактериальные микрофоссильные остатки различной морфологии

Слева — мешковидная форма с шаровидным отростком и бугорками на поверхности (спектр *a*); справа — бугорчатая форма с шипастой поверхностью (спектр *b*); сверху — общее поле обзора. Номерами отмечены соответствующие спектры из табл. 4

Fig. 5. Bacterial microfossil remains of various morphology

Left — saccular form with a bud and tubercles on the surface (spectrum *a*); right — tuberculate form with a spiny surface (spectrum *b*); top — general field of view. The numbers correspond to the spectra in table 4

Таблица 4

Химический состав (мас. %) выделенных областей для рис. 5

Table 4. Chemical composition (wt. %) of the selected areas for fig. 5

Номер спектра	C	O	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr	Ba	La	Ce	Nd
1		51,6		13,2		9,2	0,2	1,8		0,6	12		1,6	1,2	2,5	5	1,4
2		45,6	0,4	6,1	2,5	3,1	0,5	0,5		1,4	37,2			2,7			
3	10,4	45,5		4,61	1,2	3,9	0,3	2,8	2,2	0,9	24,1	0,5	1,2			2,6	
4		30,8		5,5		3,4	0,2	1		2,4	52,1			4,7			
5	12,7	54,7		3,48		1,8		0,3		0,7	25,2			1,2			

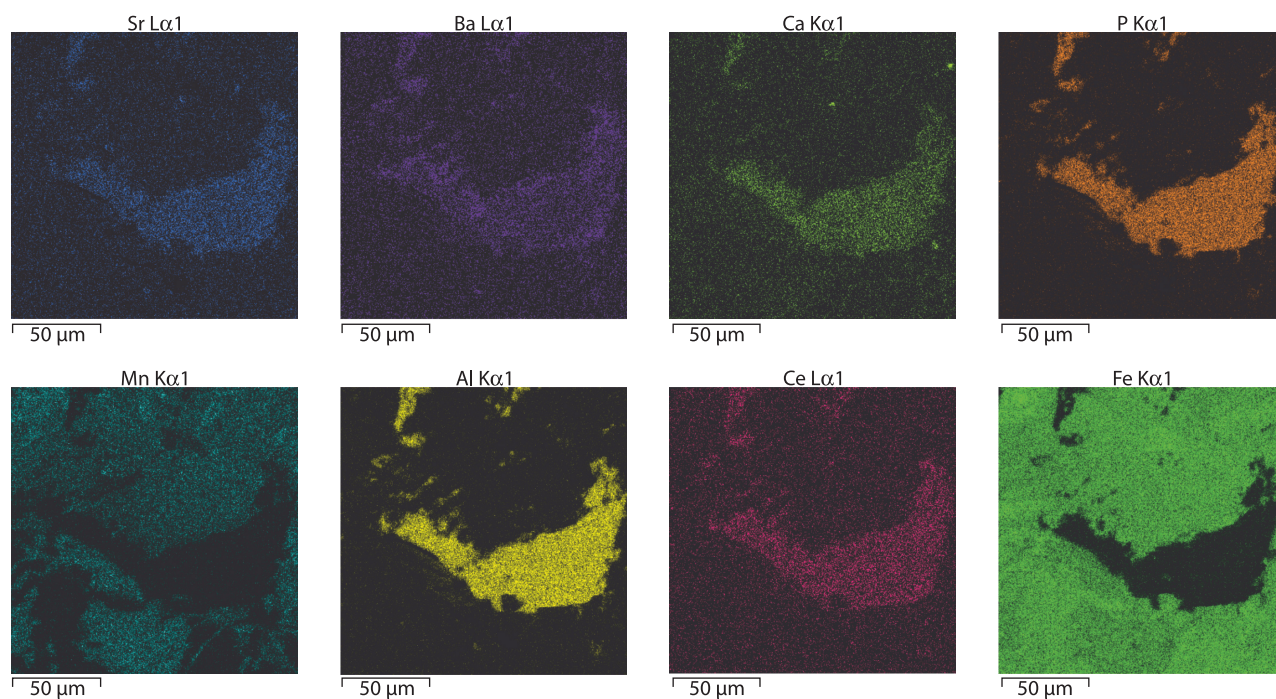


Рис. 6. Минерализованный гликокаликс на поверхности измененного Mn-сидерита и карты распределения элементов

Видна четкая локализация редкоземельных элементов исключительно в областях, покрытых фоссилизированным гликокаликсом, представленным твердым раствором: краданалит–горсейсит–гойяцит–флоренсит

Fig. 6. Mineralized glycoalkalix on the surface of the altered Mn-siderite and element distribution maps

Clear localization of rare earth elements is exclusively visible in areas covered by fossilized glycoalkalix represented by the solid solution of crandallite-gorceixite-goyazite-florencite

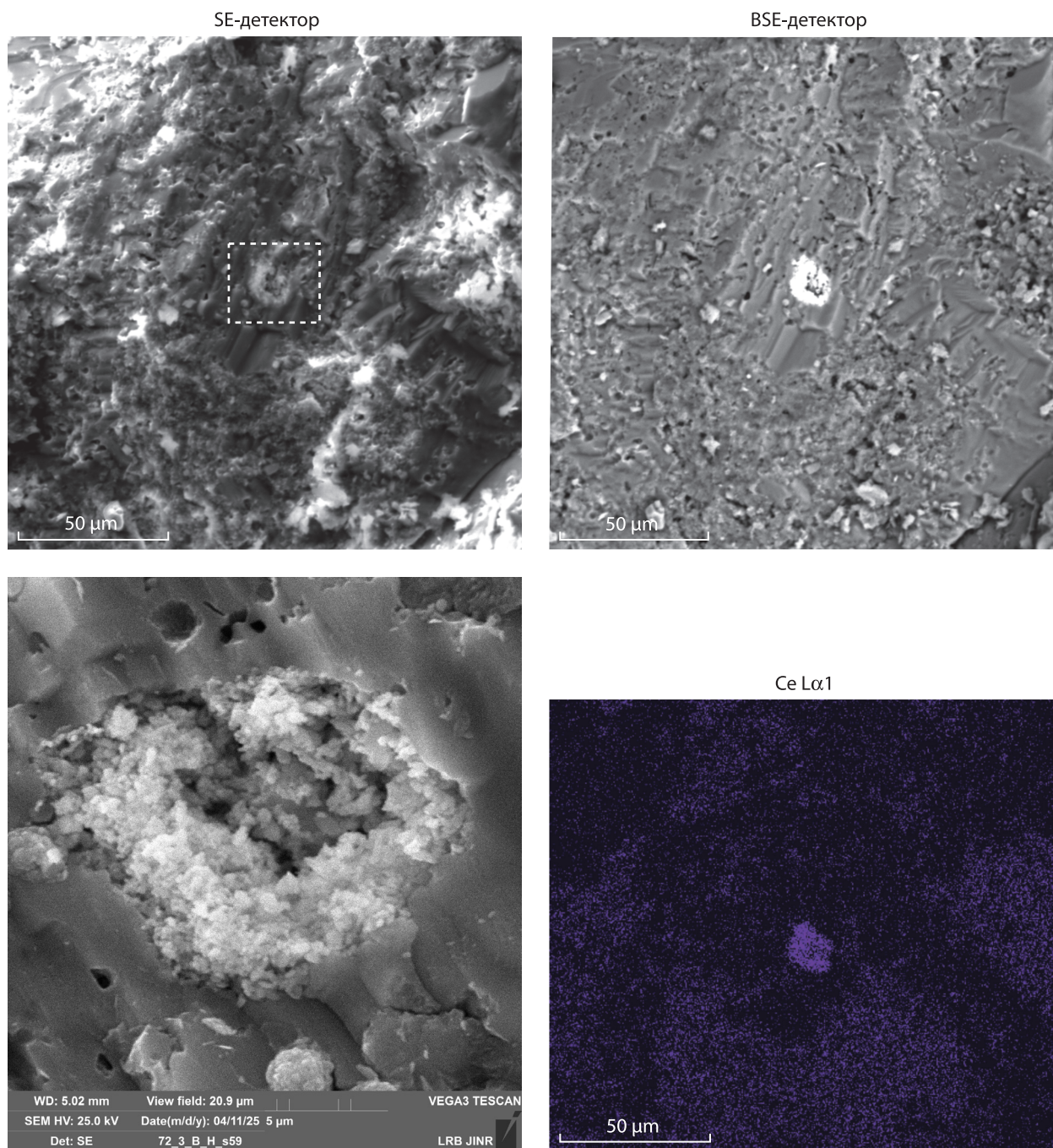


Рис. 7. Микрополость, заполненная скоплением фоссилизированных малых бациллоподобных форм (~0,5 мкм), характеризующихся высоким содержанием редкоземельных элементов и замещенных монацитом. Изображение в SE и BSE детекторах

Справа снизу — масштабированное изображение (в SE и BSE детекторах); слева снизу — карта распределения по церию. Часть породы вокруг покрыта минерализованным гликокаликсом

Fig. 7. Microcavity filled with numerous fossilized small bacilliforms (~0.5 μm) characterized by high rare earth element content and replaced by monazite. Image in SE and BSE detectors

Bottom right — tonal image; bottom left — Ce-distribution map. Mineralized glycocalyx partially covers the surrounding rock

Таблица 5

Химический состав (мас. %) малых бациллоподобных форм для рис. 7

Table 5. Chemical composition (wt. %) of small bacilliforms for fig. 7

O	Al	P	Ca	Fe	Sr	Ba	La	Ce	Pr	Nd
39,2	1,7	8,4	0,4	15,9	0,8	1,6	7,6	18,2	1,9	4,5

Прослеживается определенная корреляция между качественным составом РЗЭ и морфологическим типом. В частности, бациллоподобные формы замещаются монацитом, имеют максимальные содержания РЗЭ (в сумме более 32 мас. %) и относительно высокие значения $Ce/La = 2,4$ и $Ce/Nd = 4,0$. Коккоидные, сферические, шаровидные и мешковидные формы микрофоссилий, а также гликокаликс замещаются минералами группы плюмбогуммита, которые представляют собой промежуточные разновидности (твердые растворы) крадаллит-горсейскит-гойяцит-флоренситового состава и имеют более низкие концентрации РЗЭ (от первых до десяти мас. %) и отношения Ce/La (1,4–2,0), Ce/Nd (2,5–3,6). Возможно, этим объясняется вариативность распределения РЗЭ, отмеченная в более ранних исследованиях (Лапин и др., 2016).

Наиболее вероятным механизмом биосорбции РЗЭ является достаточно быстрое поглощение РЗЭ из растворов клетками бактерий за счет хемосорбции (Казак и др., 2018). В соответствии с результатами исследований (Takahashi et al., 2005, 2007) можно предположить, что сорбция РЗЭ микроорганизмами связана с фосфатсодержащими соединениями микробных клеток, такими как фосфаты, полифосфаты, нуклеиновые кислоты, фосфолипиды, фосфорилированные полисахариды. После сорбции бактерии могут выделять ферменты или трансферазы, которые способствуют частичному извлечению РЗЭ из клеточных стенок и направляют дальнейшие процессы сорбции–десорбции РЗЭ. Трансферазы также обладают способностью перемещать функциональные группы от одной молекулы к другой, в частности фосфатные группы между соединениями, и таким образом регулировать процесс сорбции. По-видимому, не случайно все выявленные в изученной руде Томторского месторождения фоссилизированные биоморфные аккумуляции РЗЭ представлены фосфатами (монацит) или алюмофосфатами (твердыми растворами гойяцит–горсейскит–флоренсит–крадаллит).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование фактологически показывает, что при определенных физико-химических условиях осаждение и аккумуляция редкоземельных элементов связаны с жизнедеятельностью микроорганизмов. В частности, замещение сидерита гидроксидами железа и марганца, которое могло происходить в процессах низкотемпературного гидротермального или экзогенного изменения породы, сопровождалось массовым появлением микроорганизмов–концентраторов редкоземельных элементов. Установлено, что если рудоносная порода не была заселена микробиотой, то редкоземельные элементы в ней либо не обнаруживаются, либо их концентрации ниже пределов чувствительности энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Выявлена корреляция качественного состава редкоземельных элементов с морфологическим типом микрофоссилий. Так, малые

бациллоподобные формы замещаются монацитом и содержат наибольшее количество редкоземельных элементов (в сумме более 32 мас. %). Коккоидные, сферические, шаровидные и мешковидные формы микрофоссилий, а также фоссилизированный гликокаликс замещаются минералами группы плюмбогуммита, которые представляют собой промежуточные разновидности крадаллит-горсейскит-гойяцит-флоренситового состава на измененной поверхности сидерита и имеют более низкие концентрации и соотношения редкоземельных элементов.

Проведенные бактериально-палеонтологические исследования пород томторского комплекса (Республика Саха (Якутия)) свидетельствуют, что микроорганизмы играют важную роль в концентрировании редкоземельных элементов в низкотемпературных гидротермальных и экзогенных процессах, в ходе которых формировались уникальные по запасам и содержаниям руды верхнего рудного горизонта. Полученные данные могут быть использованы при разработке биотехнологических процессов концентрирования и разделения редкоземельных элементов, а также учтены при поисках месторождений стратегического сырья. Применение биологических процессов, не оказывающих отрицательного влияния на экологическую обстановку, представляет собой привлекательную стратегию для извлечения редкоземельных элементов из руд, учитывая селективность их концентрирования микроорганизмами, установленную в последние годы (Castillo et al., 2022).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Добрецов Н. Л., Жмодик С. М., Лазарева Е. В., Брянская А. В., Пономарчук В. А., Сарыг-оол Б. Ю., Кириченко И. С., Толстов А. В., Карманов Н. С. Структурно-морфологические признаки участия микроорганизмов в формировании богатых Nb–REE-руд Томторского месторождения (Россия) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496, № 2. С. 154–157. <https://doi.org/10.31857/S2686739721020055>
- Жегалло Е. А., Розанов А. Ю. Редкоземельно-ниобиевые руды Томтора // Бактериальная палеонтология / под ред. А. Ю. Розанова. М.: РАН, 2021. С. 111–114.
- Жмур С. И., Кравченко С. М., Розанов А. Ю., Жегалло Е. А. О генезисе редкоземельно-ниобиевых руд Томтора (север Сибирской платформы) // Доклады академии наук. 1994. Т. 336, № 3. С. 372–375.
- Казак Е. С., Калинина Е. Г., Харитоновна Н. А., Челноков Г. А., Еловский Е. В., Брагин И. В. Биосорбция редкоземельных элементов и иттрия в водной среде гетеротрофными бактериями // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2018. № 2. С. 73–80. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2018-2-73-80>
- Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Добрецов Н. Л., Толстов А. В., Щербов Б. Л., Карманов Н. С., Герасимов Е. Ю., Брянская А. В. Главные рудообразующие минералы anomalно богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 6. С. 1080–1115. <https://doi.org/10.15372/GiG20150603>
- Лапин А. В., Толстов А. В., Куликова И. М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных комплексных редкометалльных рудах месторождения Томтор // Геохимия. 2016. № 12. С. 1104–1121. <https://doi.org/10.7868/S0016752516120062>

Лапин А. В., Толстов А. В., Плошко В. В., Чемизова Л. Н., Сорокина Т. И. Минерация кор выветривания карбонатов : метод. рук. М. : ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2011. 308 с.

Пономарчук В. А., Добрецов Н. Л., Лазарева Е. В., Жмодик С. М., Карманов Н. С., Толстов А. В., Пыряев А. Н. Свидетельства микробально-индуцированной минерализации в породах Томторского карбонатитового комплекса (Арктическая Сибирь) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 490, № 2. С. 33–38. <https://doi.org/10.31857/S2686739720020115>

Сарыг-оол Б. Ю., Букреева Л. Н., Мягкая И. Н., Толстов А. В., Лазарева Е. В., Жмодик С. М. Влияние химической пробоподготовки на определение высоких содержаний редкоземельных и высокозарядных элементов в геологических образцах методами ИСП-АЭС и ИСП-МС (на примере пород и руд месторождения «Томтор») // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2020. Т. 13, № 4. С. 593–605. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0208>

Толстов А. В., Тян О. А. Геология и рудоносность массива Томтор. Якутск : ЯНЦ СО РАН, 1999. 163 с.

Толстов А. В., Черенков В. Г., Баранов Л. Н. Генезис и возраст рудной толщи Томторского месторождения ниобия и редких земель, северо-восток Сибирской платформы // Руды и металлы. 2020. № 4. С. 32–44. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2020-10026>

Энтин А. Р., Зайцев А. И., Ненасhev Н. И., Василенко В. Б., Орлов А. Н., Тян О. А., Ольховик Ю. А., Ольштынский С. П., Толстов А. В. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия) // Геология и геофизика. 1990. Т. 12. С. 42–51.

Bayliss P., Kolitsch U., Nickel E. H., Pring A. Alunite supergroup: Recommended nomenclature // Mineralogical Magazine. 2010. Vol. 74, no. 5. P. 919–927. <https://doi.org/10.1180/minmag.2010.074.5.919>

Castillo J., Maleke M., Unuofin J., Cebekhulu S., Gómez-Arias A. Microbial recovery of rare earth elements // Environmental technologies to treat rare earth element pollution: Principles and engineering / eds. A. Sinharoy, P. N. L. Lens. London : IWA Publishing, 2022. P. 179–205.

Moroz T. N., Edwards H. G. M., Zhmodik S. M. Detection of carbonate, phosphate minerals and cyanobacteria in rock from the Tomtor deposit, Russia, by Raman spectroscopy // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2021. Vol. 250. P. 119372. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119372>

Takahashi Y., Châtellier X., Hattori K. H., Kato K., Fortin D. Adsorption of rare earth elements onto bacterial cell walls and its implication for REE sorption onto natural microbial mats // Chemical Geology. 2005. Vol. 219, nos. 1–4. P. 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.02.009>

Takahashi Y., Hirata T., Shimizu H., Ozaki T., Fortin D. A rare earth element signature of bacteria in natural waters? // Chemical Geology. 2007. Vol. 244, nos. 3–4. P. 569–583. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.07.005>

Zhmodik S. M., Lazareva E. A., Zhegallo E. A., Samylin O. S., Zaitseva L. V., Rozanov A. Yu. Microfossils of the niobium and rare-earth ores of the Tomtor deposit (Yakutia) and their biological interpretation // Biology Bulletin. 2024a. Vol. 51. P. S375–S383. <https://doi.org/10.1134/S106235902461334X>

Zhmodik S. M., Rozanov A. Yu., Lazareva E. V., Ivanov P. O., Belyanin D. K., Karmanov N. S., Ponomarchuk V. A., Saryg-ool B. Yu., Zhegallo E. A., Samylin O. S., Moroz T. N. Signatures of the involvement of microorganisms in the formation of nodular monazite (kularite), Republic of Sakha (Yakutia), Russia // Doklady Earth Sciences. 2024b. Vol. 516. P. 995–1003. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24601494>

Zhmodik S., Lazareva E., Dobretsov N., Ponomarchuk V., Tolstov A. Mineralogical, geochemical and isotopic (C, O, Sr) features of the unique-grade REE-Nb ores from the Tomtor deposit (Arctic Siberia, Russia) // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 98. P. 12027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199812027>

REFERENCES

Dobretsov N. L., Zhmodik S. M., Lazareva E. V., Bryanskaya A. V., Ponomarchuk V. A., Saryg-ool B. Yu., Kirichenko I. S., Tolstov A. V., Karmanov N. S. (2021). Structural and morphological features of the participation of microorganisms in the formation of Nb–REE-rich ores of the Tomtor field (Russia). *Doklady Earth Sciences*, 496, 135–138. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21020057>

Zhegallo E. A., Rozanov A. Yu. (2021). REE-Nb ores of Tomtor. In A. Yu. Rozanov (Ed.), *Bacterial paleontology* (pp. 111–114). Moscow: RAS. (In Russ.).

Zhmur S. I., Kravchenko S. M., Rozanov A. Yu., Zhegallo E. A. (1994). Genesis of rare earth-niobium ores of Tomtor (north of the Siberian platform). *Doklady Akademii Nauk*, 336(3), 372–375. (In Russ.).

Kazak E. S., Lebedeva N. A., Kharitonova N. A., Chelnokov G. A., Elovskiy E. V., Bragin I. V. (2018). Experimental study of the biosorption processes of the rare-earth elements and yttrium in the water environment by heterotrophic bacteria. *Moscow University Bulletin. Ser. 4. Geology*, (2), 73–80. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2018-2-73-80>

Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Dobretsov N. L., Tolstov A. V., Shcherbov B. L., Karmanov N. S., Gerasimov E. Yu., Bryanskaya A. V. (2015). Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 56(6), 844–873. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.05.003>

Lapin A. V., Tolstov A. V., Kulikova I. M. (2016). Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit. *Geochemistry International*, 54, 1061–1078. <https://doi.org/10.1134/S0016702916120065>

Lapin A. V., Tolstov A. V., Ploshko V. V., Chemizova L. N., Sorokina T. I. (2011). *Minerageny of carbonate weathering crust: Methodological guidance*. Moscow: GEOKART: GEOS, 308 p.

Ponomarchuk V. A., Dobretsov N. L., Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Karmanov N. S., Tolstov A. V., Pyryaev A. N. (2020). Evidence of microbial-induced mineralization in rocks of the Tomtor carbonate complex (Arctic Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 490, 76–80. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20020117>

Saryg-ool B. Yu., Bukreeva L. N., Myagkaya I. N., Tolstov A. V., Lazareva E. V., Zhmodik S. M. (2020). Influence of sample pretreatment on the analysis of high contents of rare-earth and high field strength elements in geological samples by ICP-AES and ICP-MS (case study of the Tomtor deposit). *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 13(4), 593–605. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0208>

Tolstov A. V., Tyan O. A. (1999). *Geology and ores of the Tomtor intrusion*. Yakutsk: YSC SB RAS, 163 p.

Tolstov A. V., Cherenkov V. G., Baranov L. N. (2020). Genesis and age of the Tomtor Nb and rare-earth deposit ore sequence, northeastern Siberian platform. *Ores and Metals*, (4), 32–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2020-10026>

Entin A. R., Zaitsev A. I., Nenashev N. I., Vasilenko V. B., Orlov A. N., Tian O. A., Olkhovik Yu. A., Olshtynskii S. P., Tolstov A. V. (1990) On the sequence of geological events involved into the intrusion of the Tomtor massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites (Northwestern Yakutia). *Russian Geology and Geophysics*, 12, 42–51.

Bayliss P., Kolitsch U., Nickel E. H., Pring A. (2010). Alunite supergroup: Recommended nomenclature. *Mineralogical Magazine*, 74(5), 919–927. <https://doi.org/10.1180/minmag.2010.074.5.919>

Castillo J., Maleke M., Unuofin J., Cebekhulu S., Gómez-Arias A. (2022). Microbial recovery of rare earth elements. In A. Sinharoy, P. N. L. Lens (Eds.), *Environmental technologies to treat rare earth element pollution: Principles and engineering* (pp. 179–205). London: IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781789062236_0179

Moroz T. N., Edwards H. G. M., Zhmodik S. M. (2021). Detection of carbonate, phosphate minerals and cyanobacteria in rock from the Tomtor deposit, Russia, by Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular*

and *Biomolecular Spectroscopy*, 250, 119372. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119372>

Takahashi Y., Châtellier X., Hattori K. H., Kato K., Fortin D. (2025). Adsorption of rare earth elements onto bacterial cell walls and its implication for REE sorption onto natural microbial mats. *Chemical Geology*, 219(1–4), 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.02.009>

Takahashi Y., Hirata T., Shimizu H., Ozaki T., Fortin D. (2007). A rare earth element signature of bacteria in natural waters? *Chemical Geology*, 244(3–4), 569–583. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.07.005>

Zhmodik S. M., Lazareva E. A., Zhegallo E. A., Samylna O. S., Zaitseva L. V., Rozanov A. Yu. (2024a). Microfossils of the niobium and rare-earth ores of the Tomtor deposit

(Yakutia) and their biological interpretation. *Biology Bulletin*, 51, S375–S383. <https://doi.org/10.1134/S106235902461334X>

Zhmodik S. M., Rozanov A. Yu., Lazareva E. V., Ivanov P. O., Belyanin D. K., Karmanov N. S., Ponomarchuk V. A., Saryg-ool B. Yu., Zhegallo E. A., Samylna O. S., Moroz T. N. (2024b). Signatures of the involvement of microorganisms in the formation of nodular monazite (kularite), Republic of Sakha (Yakutia), Russia. *Doklady Earth Sciences*, 516, 995–1003. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24601494>

Zhmodik S., Lazareva E., Dobretsov N., Ponomarchuk V., Tolstov A. (2019). Mineralogical, geochemical and isotopic (C, O, Sr) features of the unique-grade REE-Nb ores from the Tomtor deposit (Arctic Siberia, Russia). *E3S Web of Conferences*, 98, 12027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199812027>

Сергей Михайлович Жмодик

Доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-8095-4485>
Scopus Author ID 7004753839
WoS ResearcherID O-2431-2013
РИНЦ SPIN-код 9986-9995
zhmodik@igm.nsc.ru

Елена Александровна Жегалло

Кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник

Институт биологии развития им. Н. К. Кольцова РАН,
Москва, Россия
Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка
Российской академии наук,
Москва, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-1089-9219>
Scopus Author ID 6602832773
WoS ResearcherID OYE-5728-2025
РИНЦ SPIN-код 1066-8883
oghiganov@mail.ru

Елена Владимировна Лазарева

Кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-6617-3287>
Scopus Author ID 7006614260
РИНЦ SPIN-код 5696-6880
lazareva@igm.nsc.ru

Егор Алексеевич Сапрыкин

Младший научный сотрудник,
Лаборатория радиационной биологии

Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

<https://orcid.org/0009-0002-2658-2128>
Scopus Author ID 57222191200
netherilpayments@gmail.com

Sergey M. Zhmodik

DSc (Geology and Mineralogy),
Chief Researcher

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0001-8095-4485>
Scopus Author ID 7004753839
WoS ResearcherID O-2431-2013
RSCI SPIN-code 9986-9995
zhmodik@igm.nsc.ru

Elena A. Zhegallo

PhD (Geology and Mineralogy),
Senior Researcher

Koltzov Institute of Developmental Biology
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Borissiak Paleontological Institute
of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

<https://orcid.org/0000-0003-1089-9219>
Scopus Author ID 6602832773
WoS ResearcherID OYE-5728-2025
RSCI SPIN-code 1066-8883
oghiganov@mail.ru

Elena V. Lazareva

PhD (Geology and Mineralogy),
Senior Researcher

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0001-6617-3287>
Scopus Author ID 7006614260
RSCI SPIN-code 5696-6880
lazareva@igm.nsc.ru

Egor A. Saprykin

Junior Researcher,
Laboratory of Radiation Biology

Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Russia

<https://orcid.org/0009-0002-2658-2128>
Scopus Author ID 57222191200
netherilpayments@gmail.com

Михаил Игоревич Капралов

Научный сотрудник,
Лаборатория радиационной биологии

Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-4566-8488>
Scopus Author ID 55929577300
WoS ResearcherID M-6194-2016
РИНЦ SPIN-код 1238-3738
mast34@mail.ru

Наталья Васильевна Грубова

Ведущий инженер

Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка
Российской академии наук,
Москва, Россия

<https://orcid.org/0009-0005-2914-5048>
grubovanatasha@yandex.ru

Алексей Юрьевич Розанов

Доктор геолого-минералогических наук, профессор,
академик РАН, заведующий лабораторией³,
начальник сектора Лаборатории радиационной биологии⁴,
главный научный сотрудник^{1, 2, 5}

¹ Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

² Институт биологии развития им. Н. К. Кольцова РАН,
Москва, Россия

³ Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка
Российской академии наук,
Москва, Россия

⁴ Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

⁵ Национальный парк «Ленские столбы»,
Покровск, Россия

<https://orcid.org/0009-0006-7251-1223>
Scopus Author ID 7102807959
aroza@paleo.ru

Mikhail I. Kapralov

Researcher,
Laboratory of Radiation Biology

Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Russia

<https://orcid.org/0000-0003-4566-8488>
Scopus Author ID 55929577300
WoS ResearcherID M-6194-2016
RSCI SPIN-code 1238-3738
mast34@mail.ru

Natalya V. Grubova

Leading Engineer

Borissiak Paleontological Institute
of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

<https://orcid.org/0009-0005-2914-5048>
grubovanatasha@yandex.ru

Alexei Yu. Rozanov

DSc (Geology and Mineralogy), Professor,
Academician of RAS, Head of Laboratory³,
Head of Sector, Laboratory of Radiation Biology⁴,
Chief Researcher^{1, 2, 5}

¹ V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

² Koltzov Institute of Developmental Biology
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Borissiak Paleontological Institute
of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

⁴ Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Russia

⁵ Lena Pillars National Park,
Pokrovsk, Russia

<https://orcid.org/0009-0006-7251-1223>
Scopus Author ID 7102807959
aroza@paleo.ru

Вклад авторов: Жмодик С. М. — руководитель работ. Жегалло Е. А. — отбор материала.
Лазарева Е. В. — согласование выбора материала для анализа. Сапрыкин Е. А. — компьютерная обработка.
Капралов М. И. — компьютерная обработка. Грубова Н. В. — отбор материала. Розанов А. Ю. — научное руководство.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: Zhmodik S. M. — project administration. Zhegallo E. A. — sample selection.
Lazareva E. V. — coordination of the sample selection for formal analysis. Saprykin E. A. — software.
Kapralov M. I. — software. Grubova N. V. — sample selection. Rozanov A. Yu. — supervision.

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

Статья поступила в редакцию 03.12.2025
Одобрена после рецензирования 13.03.2026
Принята к публикации 23.06.2026

Submitted 03.12.2025
Approved after reviewing 13.03.2026
Accepted for publication 23.06.2026