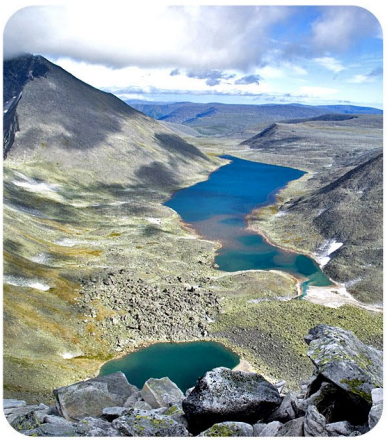

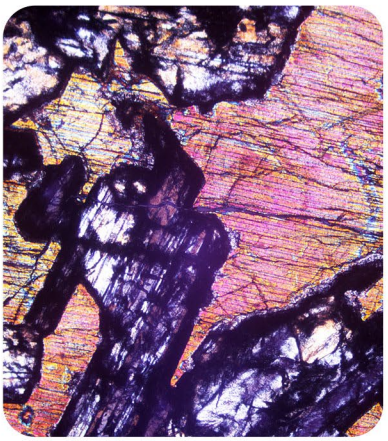

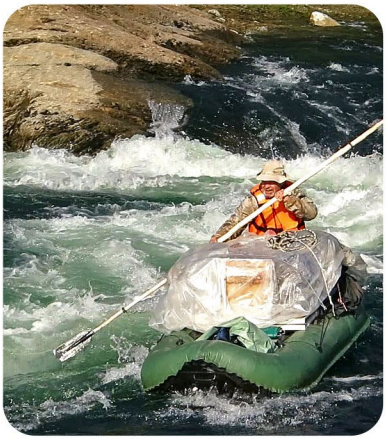

ISSN 2712-7761

№ 10 (358), октябрь 2024

Вестник геонаук

Геопринт

Vestnik of Geosciences
Вестник геонаук

Октябрь
October
2024,
№ 10 (358)

Журнал издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН
The journal is published under the research and methodological guidance of the RAS Department of Earth Sciences

Главный редактор *А. М. Асхабов*

Зам. главного редактора *И. Н. Бурцев*

Зам. главного редактора *О. Б. Котова*

Ответственный секретарь *И. В. Козырева*

Редакционный совет

Л. Н. Андреичева, Сыктывкар, Россия
А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
Т. М. Безносова, Сыктывкар, Россия
М. А. Богдасаров, Брест, Беларусь
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, Апатиты, Россия
А. Д. Гвишиани, Москва, Россия
В. А. Жемчугова, Москва, Россия
А. В. Журавлев, Сыктывкар, Россия
Д. А. Зедгенизов, Екатеринбург, Россия
В. А. Каширцев, Новосибирск, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия
Н. А. Малышев, Москва, Россия
М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия
Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия
П. Мянник, Таллин, Эстония
А. И. Николаев, Апатиты, Россия
Б. М. Осовецкий, Пермь, Россия
Ю. Ф. Патраков, Кемерово, Россия
И. В. Пеков, Москва, Россия
Д. В. Пономарев, Сыктывкар, Россия
Д. Ю. Пущаровский, Москва, Россия
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
Ш. Сун, Мяньян, Китай
К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США
О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия
М. А. Федонкин, Москва, Россия
А. Г. Шеломенцев, Екатеринбург, Россия

Технический редактор *Г. Н. Каблис*

Заведующий редакцией *Т. А. Некучаева*

Chief Editor *A. M. Askhabov*

Deputy Chief Editor *I. N. Burtsev*

Deputy Chief Editor *O. B. Kotova*

Executive Secretary *I. V. Kozyreva*

Editorial Board

L. N. Andreicheva, Syktyvkar, Russia
A. I. Antoshkina, Syktyvkar, Russia
T. M. Beznosova, Syktyvkar, Russia
M. A. Bogdasarov, Brest, Belarus
M. A. T. M. Broeckmans, Trondheim, Norway
D. A. Bushnev, Syktyvkar, Russia
Yu. L. Voytekhovsky, Apatity, Russia
A. D. Gvishiani, Moscow, Russia
V. A. Zhemchugova, Moscow, Russia
A. V. Zhuravlev, Syktyvkar, Russia
D. A. Zedgenizov, Yekaterinburg, Russia
V. A. Kashirtcev, Novosibirsk, Russia
M. Komac, Ljubljana, Slovenia
S. V. Krivovichev, St. Petersburg, Russia
S. K. Kuznetsov, Syktyvkar, Russia
N. A. Malyshev, Moscow, Russia
M. Martins, Ouro Preto, Brazil
T. P. Mayorova, Syktyvkar, Russia
P. Männik, Tallinn, Estonia
A. I. Nikolaev, Apatity, Russia
B. V. Osovetsky, Perm, Russia
Yu. F. Patrakov, Kemerovo, Russia
I. V. Pekov, Moscow, Russia
D. V. Ponomarev, Syktyvkar, Russia
D. Yu. Pushcharovsky, Moscow, Russia
A. M. Pystin, Syktyvkar, Russia
Sh. Sun, Mianyang, China
C. M. Soja, Hamilton, NY, USA
O. V. Udoratina, Syktyvkar, Russia
M. A. Fedonkin, Moscow, Russia
A. G. Shelomentsev, Yekaterinburg, Russia

Technical Editor *G. N. Kablis*

Managing Editor *T. A. Nekuchaeva*

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит ежемесячно. Основан в 1995 году академиком Н. П. Юшкиным.
Предыдущее название:
Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ журнала (2023) – **0.425**

SCIENTIFIC JOURNAL

Monthly issued. Founded in 1995 by Academician N. P. Yushkin.
Former title:
Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Five-year RSCI impact factor (2023) — **0.425**

geo.komisc.ru/vestnik

Содержание

Научные статьи

Парагенез доломитов и сепиолитов в отложениях каширского и подольского горизонтов платформенной части Башкортостана: возможное биогенное происхождение
Р. В. Мирнов, А. А. Николаев 3

Минеральные источники Янейтывисского месторождения минеральных подземных вод (Республика Коми)
Т. П. Митюшева 12

Технологическая минералогия руд стратегических металлов: достижения, проблемы, перспективы
Е. Г. Ожогина, О. Б. Котова 28

Из опыта преподавания.
XV. Кристаллографические бордюры и филлотаксис
Ю. Л. Войтеховский, А. Д. Гунченкова 35

Влияние толщины пластин шунгита на его электрофизические свойства: технологический и геофизический аспекты
Е. А. Голубев, И. В. Антонец 40

Хроника, события, факты. История науки

Роль Комиссии по технологической минералогии РМО в повышении полноты и комплексности использования минерального сырья 46

Content

Scientific articles

Dolomite-sepiolite interaction in Kashira and Podolsk deposits of platform part of Bashkortostan: possible biogenic origin
R. V. Mirnov, A. A. Nikolaev 3

Mineral springs of the Yaneytyvis deposit of mineral waters (Komi Republic)
T. P. Mityusheva 12

Technological mineralogy of strategic metal ores: achievements, problems, prospects
E. G. Ozhogina, O. B. Kotova 28

From teaching experience.
XV. Crystallographic borders and phyllotaxis
Yu. L. Voytekhovsky, A. D. Gunchenkova 35

Effect of shungite plate thickness on its electrophysical properties: technological and geophysical aspects
Ye. A. Golubev, I. V. Antonets 40

Chronicle, events, facts. History of Science

The role of the RMS Technological Mineralogy Commission in improving the completeness and integrity of mineral raw utilization 46

Правила оформления статей

Vestnik article Formatting

geo.komisc.ru/vestnik/authors

УДК 550.72:552.543 DOI: 10.19110/geov.2024.10.1

Парагенез доломитов и сепиолитов в отложениях каширского и подольского горизонтов платформенной части Башкортостана: возможное биогенное происхождение

Р. В. Мирнов, А. А. Николаев

ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

MirnovRV@bnipi.rosneft.ru

Статья посвящена генезису микрокристаллических доломитов каширского и подольского горизонтов московского яруса, которые являются коллекторами для нефти в западной части Башкортостана. Они слагают выдержанные пласты малой мощности, прослеживаемые на десятки километров, что определяет актуальность изучения условий доломитообразования. Доломиты сложены кристаллами размером 1–10 мкм с включениями сульфатов и примесью сепиолитов. Сепиолиты развиты в межкристаллическом пространстве в виде тончайших нитей и пленок, окутывающих кристаллы доломита. Детальное исследование сепиолитов на растровом электронном микроскопе с проведением экспериментов по частичному растворению доломитов кислотой показало обилие бактериоморфов сепиолитового состава. Рассмотрено распределение РЗЭ и Y в доломитах и вмещающих породах. По ряду образцов доломитов отмечается хорошая сходимость по спектрам РЗЭ. В результате проведенного комплекса исследований сделан вывод о микробиально-индуцированном образовании доломита и сепиолита в наиболее мелководной части морского бассейна с повышенной соленостью.

Ключевые слова: *первичные доломиты, сепиолиты, микробиально-индуцированное породообразование, РЗЭ*

Dolomite-sepiolite interaction in Kashira and Podolsk deposits of platform part of Bashkortostan: possible biogenic origin

R. V. Mirnov, A. A. Nikolaev

RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, Russia

The article is devoted to the genesis of microcrystalline dolomites of the Kashira and Podolsk horizons of the Moscow stage, which are oil reservoirs in the western part of Bashkortostan. They form consistent layers of low thickness, traceable for tens of kilometers, which determines the relevance of studying the conditions of dolomite formation. Dolomites are composed of crystals 1–10 μm in size with sulfate inclusions and sepiolite admixture. Sepiolites are developed in the intercrystalline space as the finest threads and films enveloping dolomite crystals. A detailed study of sepiolites with a scanning electron microscope with experiments on partial dissolution of dolomites with acid showed an abundance of bacteriomorphs of sepiolite composition. The distribution of REE and Y in dolomites and host rocks is considered. Good convergence in REE spectra is noted for a number of dolomite samples. As a result of the conducted complex of studies, a conclusion is made about the microbial-induced formation of dolomite and sepiolite in the shallowest part of the sea basin with high salinity.

Keywords: *primary dolomites, sepiolite, microbially-induced rock formation, REE*

Введение

Дискуссия о происхождении доломитов и возможных механизмах осаждения «первичных» седиментационных доломитов ведется уже более столетия и остается актуальной в настоящее время. Области образования современных доломитовых осадков крайне ограничены и несопоставимы по масштабам с областями развития выдержанных мощных толщ доломитов, которые мы наблюдаем в геологической летописи докембрия. С совершенствованием лабораторных методов исследования обнаруживается все больше доказательств участия микроорганизмов в кристаллизации пород, в т. ч. доломитов и глинистых минералов. Изучение этого механизма — микробиально-индуцированного породообразования — является одним из возможных ключей для решения «доломитовой проблемы».

Настоящее исследование посвящено микрокристаллическим доломитам каширского и подольского горизонта московского яруса, в которых присутствует примесь магнезиальных силикатов — сепиолитов. Доломиты слагают выдержанные на сотни километров пласты мощностью до 10 м. Большая площадь распространения и однородность пластовых доломитовых тел дают основания предполагать их «первичность», а специфический минералогический состав (примесь сепиолитов) добавляет новую информацию для изучения процессов минералообразования. До настоящего времени геологами, изучавшими отложения каширского горизонта, высказывались предположения об их

Для цитирования: Мирнов Р. В., Николаев А. А. Парагенез доломитов и сепиолитов в отложениях каширского и подольского горизонтов платформенной части Башкортостана: возможное биогенное происхождение // Вестник геонаук. 2024. 10(358). С. 3–11. DOI: 10.19110/geov.2024.10.1

For citation: Mirnov R. V., Nikolaev A. A. Dolomite-sepiolite interaction in Kashira and Podolsk deposits of platform part of Bashkortostan: possible biogenic origin. Vestnik of Geosciences, 2024, 10(358), pp. 3–11, doi: 10.19110/geov.2024.10.1

исключительно метасоматической природе (Виссарионова, 1975), отдельные авторы относили их к хемогенным осадкам лагун (Тюрихин, 1968*, Хазипов, Ступакова, 2017).

Генезис доломитов каширского и подольского горизонтов представляет не только научный, но и практический интерес. На изучаемой территории — платформенной части Башкортостана — каширские и подольские отложения характеризуются промышленной нефтеносностью. Доломиты имеют высокую пористость (до 39 %) и пониженную проницаемость (0.01–0.1 мкм^2). В последние десятилетия пласты микрокристаллических доломитов активно вовлекаются в разработку за счет внедрения бурения горизонтальных стволов с проведением гидроразрыва пласта.

Целью проведенной работы было определение генезиса доломитов каширского и подольского горизонтов на основе комплекса лабораторных методов.

Фактический материал и методы исследования

Основой для исследования послужил керновый материал более 45 скважин, а также каротажные кривые более 3000 скважин, пробуренных в платформенной части Башкортостана. Проведено детальное литологическое изучение керна с выделением литологических типов пород и уровней перерывов, после чего керн был увязан с кривыми ГИС, что позволило проследить изменчивость разреза на большой площади.

Исследования микроструктуры пустотного пространства горных пород и его минерального состава были проведены на сканирующем электронном микроскопе Thermo Scientific Q250 analytical SEM компании FEI (Нидерланды).

Метод сканирующей электронной микроскопии применялся для визуализации морфологических особенностей породы и структуры порового пространства. Предварительно образцы прошли экстракцию в аппаратах Сокслета до образования прозрачного растворителя. Далее для получения свежего скола производилось откалывание образцов на наковальне до размера 2 × 2 × 2 см с целью удобства размещения в камере микроскопа. Затем для предотвращения накопления заряда на поверхности горных пород образцы с помощью напылительной установки были покрыты тонким (10 нм) слоем проводящего материала. Подготовленные образцы были исследованы на сканирующем электронном микроскопе при различных увеличениях с получением изображений при помощи детектора вторичных электронов.

Для геохимических исследований из керна скважин были отобраны образцы различных литологических типов, включая микрокристаллические доломиты, в которых методом ICP-MS определено содержание редких и рассеянных элементов. Полученные значения редкоземельных элементов и иттрия нормированы на PAAS, а затем сопоставлены с современным содержанием этих элементов в поверхностных водах Тихого океана (Zhang, Nozaki, 1996). По пяти образцам микрокристаллических доломитов на масс-спектрометре DELTA V Advantage в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар) был проведен анализ изотопов углерода и кислорода. Основная часть исследований проведена в лаборатории ООО «РН-БашНИПИнефть» (Уфа).

Состав и текстурные особенности доломитов каширского и подольского горизонтов

В результате анализа керна и каротажных данных выявлено, что доломиты каширского горизонта залегают в виде выдержанных на сотни километров по латерали пластовых тел. Они приурочены к верхним частям седиментационных циклитов, а в кровле содержат прослои палеопочв, свидетельствующих о длительных субаэральных перерывах (Мирнов, Алексеева, 2022).

Каширские доломиты имеют микрокристаллическую структуру, массивную, реже неотчетливую горизонтально-слоистую текстуру. Коллекторами для нефти служат прежде всего массивные разности, слоистые же обладают низкой проницаемостью (чаще всего менее 0.01 мкм^2). В случае отсутствия нефтенасыщения для доломитов характерен мелоподобный облик — белый цвет и низкая удельная плотность, обусловленная высокой пористостью, доходящей до 30–39 %.

Кристаллы изученного доломита, преимущественно идиоморфные и гипидиоморфные, имеют средний размер от 1 до 10 мкм (встречаются единичные более крупные кристаллы до 20 мкм). В породах полностью отсутствуют органогенные остатки и «теневые» реликтовые структуры, характерные для доломитизированных известняков. Отмечаются включения сульфатов (преимущественно ангидрита, реже гипса), которых практически нет в различных литологических типах известняков.

Часто в доломитах встречаются своеобразные деформационные текстуры, которые, вероятно, образованы за счет движения флюидов снизу вверх: субвертикальные, иногда извилистые прожилки, вдоль которых развиты включения сульфатов (рис. 1, a), и деформированные слойки выпуклой формы (рис. 1, b), отражающие, вероятно, физический процесс давления снизу вверх на нелитифицированный осадок. В микрокристаллических доломитах подольского горизонта наряду с деформированными слойками встречены брекчированные прослои и трещины, частично заполненные ангидритом (рис. 2). Непосредственно под прослоем палеопочвы отмечается более крупное желваковидное включение ангидрита. В перекрывающих палеопочвы известняках включения ангидрита отсутствуют.

Описанные деформации, вероятнее всего, указывают на растворение и удаление гипса в нелитифицированном осадке и на начальной стадии его литификации в результате деятельности сульфатредуцирующих бактерий. Ярким подтверждением тому служат

* Тюрихин А. М. Строение и литолого-фациальные условия развития карбонатных пород-коллекторов верхнего девона, нижнего и среднего карбона платформенной части Башкирии: дис. … канд. геол.-мин. наук. Уфа, 1968. 494 с.

Tyurikhin A. M. Structure and lithofacies conditions of development of carbonate reservoir rocks of the Upper Devonian, Lower and Middle Carboniferous of the platform part of Bashkiria: diss. Cand. Geol.-Min. Sci., Ufa, 1968, 494 p. (in Russian).

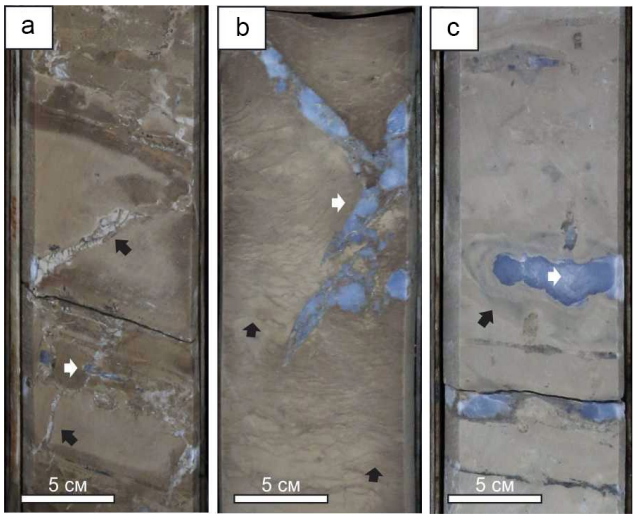

Рис. 1. Микрокристаллические доломиты с включениями ангидрита (показаны белыми стрелками). Фото керна: a — следы удаления флюидов (черные стрелки), вдоль которых развиты включения ангидрита; b — деформированные слойки выпуклой формы (черные стрелки); c — ореол рассеянных сульфидов железа (черная стрелка) вокруг желвака ангидрита

Fig. 1. Microcrystalline dolomites with anhydrite inclusions (white arrows). Core photographs: a — traces of fluid removal (black arrows), along which anhydrite inclusions are developed; b — deformed layers of convex shape (black arrows); c — halo of dispersed iron sulfides (black arrow) around an anhydrite nodule

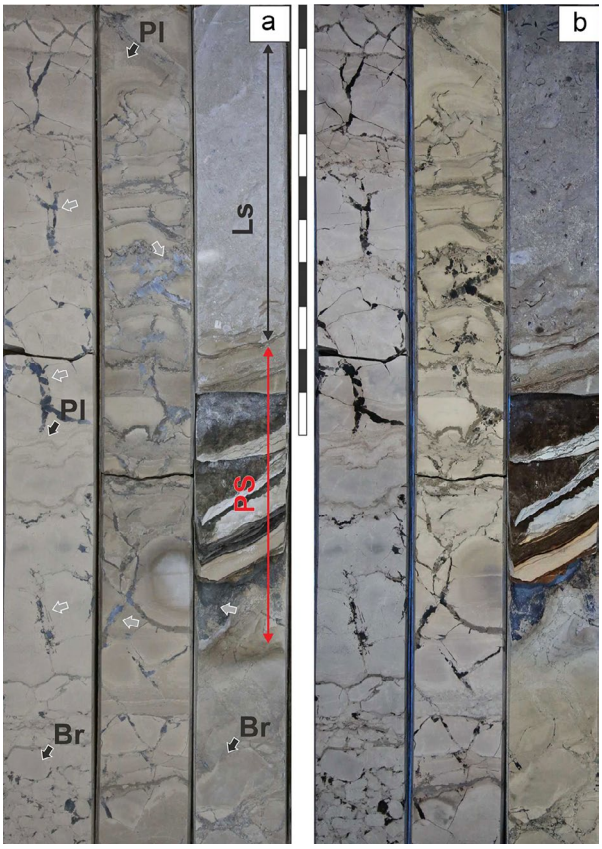

Рис. 2. Следы растворения сульфатов в доломитах подольского горизонта. Фото керна в дневном (a) и ультрафиолетовом (b) свете. Br — брекчированные прослои, Pl — текстуры пластической деформации, PS — палеопочва, Ls — известняк, серыми стрелками показаны включения ангидрита. Цена деления линейки — 5 см

Fig. 2. Traces of sulfate dissolution in dolomites of the Podolsk horizon. Photo of the core in daylight (a) and ultraviolet (b) light. Br — brecciated layers, Pl — plastic deformation textures, PS — paleosoil, Ls — limestone, gray arrows show inclusions of anhydrite. The division value of the ruler is 5 cm

«ореолы» рассеянных сульфидов железа вокруг желваков ангидрита (рис. 1, c). В кровельных частях пачек доломитов встречаются прослои с пятнистой текстурой, также обусловленной рассеянной сульфидной минерализацией. Доломиты схожего облика (patterned dolomites) описаны, например, в отложениях верхнеюрской арабской формации Персидского залива (Kirkham, 2004) — подобные текстуры являются типичным признаком участия в породообразовании сульфатредуцирующих бактерий, трансформирующих сульфаты в сульфиды.

Литолого-геохимическая характеристика изученных отложений

В основании циклитов каширского горизонта залегают прослои наиболее «глубоководных» литологических разностей — известняков пелитоморфных с раковинным детритом, обогащенных органическим веществом (И3), и известняков пелитоморфно-шламовых со спикулами губок (И4). Выше они сменяются характерным элементом — мелководными органогенно-обломочными известняками (И6), в составе которых преобладают окатанные, часто хорошо сортированные раковины фораминифер, а также присутствует незначительное количество обломков зеленых и багряных водорослей, раковин брахиопод, кораллов. Такие известняки обладают высокими фильтрационно-емкостными характеристиками и часто слагают продуктивные пласты совместно с перекрывающими их микрокристаллическими доломитами.

Для анализа среды образования упомянутых доломитов были проведены геохимические исследования методами ICP-MS и изотопной геохимии, а затем проанализировано распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) и иттрия отдельно по каждому из перечисленных выше литотипов. Содержания РЗЭ и Y приведены в таблице 1. На рисунке 3 показано их распределение после нормировки на PAAS относительно поверхностных вод Тихого океана (Zhang, Nozaki, 1996). Ввиду парагенеза доломитов с мелководными отложениями и палеопочвами для сравнения было выбрано усредненное значение по образцам с глубин от 0 до 30 м.

Органогенно-обломочные известняки показывают очень хорошую корреляцию с современными океаническими водами (рис. 3, И6), что, вероятно, указывает на их близкий состав с водами каширского бассейна. Образцы наиболее глубоководных литотипов (рис. 3, И3, И4) характеризуются отрицательной Eu-аномалией, что может быть связано с незначительной примесью глинистого материала и органического вещества. Тем не менее отмечаются низкое суммарное содержание РЗЭ и близкие формы диаграмм по образцам выбранных литотипов.

Исследованные образцы микрокристаллических доломитов в двух скважинах четко разделяются на две группы. Первая группа, по-видимому, несет «сигнал»

Таблица 1. Содержание редкоземельных элементов и Y в известняках и доломитах каширского горизонта

Table 1. Content of rare earth elements and Y in limestones and dolomites of the Kashira horizon

№ скважины Borehole No.	№ обр. Sample No.	ЛТ Lithological types	Y, ppm	La, ppm	Ce, ppm	Pr, ppm	Nd, ppm	Sm, ppm	Eu, ppm	Gd, ppm	Tb, ppm	Dy, ppm	Ho, ppm	Er, ppm	Tm, ppm	Yb, ppm	Lu, ppm
11	1	Д	0.683061	0.233659	0.143257	0.039598	0.204516	0.042002	0.015373	0.052145	0.008857	0.054057	0.012351	0.035207	0.004805	0.028525	0.003984
11	2	Д	0.625025	0.287484	0.339788	0.052684	0.262638	0.053491	0.016254	0.063921	0.011076	0.069202	0.014971	0.040266	0.005396	0.031294	0.004371
11	3	Д	0.350751	0.104965	0.122596	0.007188	0.088121	0.015873	0.004362	0.024092	0.003963	0.023246	0.004813	0.012292	0.00188	0.012682	0.001771
11	4	Д	0.579002	0.164343	0.004307	0.018109	0.113895	0.023701	0.007636	0.033843	0.00654	0.045676	0.010553	0.030412	0.004475	0.028992	0.004049
11	5	Д	0.426556	0.223708	0.178442	0.029636	0.176095	0.037706	0.005543	0.029158	0.005431	0.036624	0.007309	0.017801	0.002845	0.02	0.002794
11	6	Д	0. 3833	0.480817	0.332193	0.051988	0.273141	0.055736	0.009105	0.05643	0.011258	0.080878	0.016332	0.040399	0.006343	0.04387	0.006127
11	7	Д	1.222719	0.564588	0.9049	0.130365	0.617372	0.133939	0.030621	0.155701	0.026713	0.164994	0.035518	0.094993	0.01416	0.093018	0.012992
11	8	И4	0.71622	0.337236	0.222916	0.047635	0.241436	0.038747	0.005615	0.043447	0.00877	0.063641	0.012904	0.032092	0.004757	0.031065	0.004339
11	9	И4	0.636391	0.277922	0.110292	0.030065	0.173696	0.024341	0.003846	0.036472	0.007305	0.052657	0.010029	0.022851	0.003899	0.028999	0.00405
11	10	И3	0.803935	0.362709	0.198018	0.040162	0.231628	0.0433	0.007744	0.047108	0.009533	0.069324	0.01145	0.02006	0.003964	0.032715	0.004569
11	11	Д	1.11832	0.26062	0.036958	0.026677	0.19255	0.036837	0.00639	0.053696	0.010873	0.079102	0.016425	0.042092	0.00641	0.043038	0.006011
11	12	Д	0.976968	0.232255	0.130485	0.035545	0.212198	0.035965	0.005189	0.048874	0.01003	0.07379	0.016275	0.044715	0.00619	0.037399	0.005224
11	13	Д	1.363867	0.517585	0.879309	0.096159	0.441279	0.076464	0.02154	0.095702	0.0162	0.098478	0.024642	0.076375	0.009626	0.051164	0.007146
11	14	Д	1.527751	0.352353	0.368337	0.068859	0.394113	0.082807	0.022649	0.113045	0.020314	0.13208	0.029327	0.081153	0.010767	0.061607	0.008605
11	15	И6	1.911918	0.659873	0.435184	0.068378	0.391825	0.072335	0.022592	0.118126	0.023975	0.174765	0.038524	0.105776	0.01458	0.087635	0.01224
11	16	И6	2.384829	0.568598	0.800736	0.091307	0.464474	0.096804	0.029836	0.146607	0.026467	0.172932	0.042246	0.128251	0.017365	0.102057	0.014255
11	17	И6	2.869122	1.270743	0.492652	0.120346	0.584914	0.118219	0.034489	0.199491	0.035739	0.231636	0.055484	0.165483	0.023082	0.140755	0.01966
11	18	И6	2.877069	0.713689	0.520487	0.122761	0.590449	0.12645	0.034705	0.194662	0.034005	0.214403	0.053662	0.166348	0.022964	0.13829	0.019315
11	19	И6	3.076916	0.857859	0.654166	0.137953	0.69663	0.149776	0.039254	0.2261	0.039392	0.24763	0.059487	0.177889	0.024376	0.145448	0.020315
11	20	И6	1.253027	0.38189	0.372012	0.065648	0.324534	0.063345	0.017175	0.07877	0.013924	0.088957	0.022343	0.069469	0.008793	0.047042	0.00657
11	21	И6	1.394903	0.433734	0.452785	0.070697	0.359691	0.071589	0.018669	0.094581	0.017031	0.110982	0.026806	0.080559	0.010386	0.057095	0.007975
11	22	И6	0.306577	0.285567	0.152803	0.013008	0.094572	0.024134	0.006669	0.009109	0.002789	0.026047	0.005384	0.013718	0.001188	0.00193	0.00027
19	1	Д	0.755233	0.270671	0.412354	0.06951	0.29264	0.072594	0.012342	0.071495	0.012781	0.079584	0.023649	0.055813	0.007175	0.053771	0.00685
19	2	Д	0.435411	0.201099	0.244236	0.038127	0.142887	0.030885	0.002146	0.028446	0.006676	0.042048	0.013842	0.028655	0.002997	0.024616	0.003489
19	3	Д	0.414163	0.14318	0.221946	0.035578	0.133816	0.039121	0.002075	0.030513	0.005282	0.040495	0.012622	0.028546	0.002884	0.023658	0.003146
19	4	Д	0.422118	0.149285	0.231639	0.034823	0.124278	0.031867	0.002042	0.0296	0.005749	0.041783	0.012396	0.026549	0.003244	0.019523	0.003097
19	5	Д	0.43438	0.156893	0.256364	0.035859	0.144795	0.035043	0.003667	0.029843	0.006159	0.035754	0.01323	0.025926	0.002965	0.022638	0.003028
19	6	Д	0.401464	0.15548	0.276582	0.039768	0.152293	0.035607	0.003632	0.028801	0.006774	0.042604	0.013768	0.025242	0.003033	0.023457	0.002505
19	7	Д	0.583709	0.236132	0.410975	0.057309	0.230212	0.054322	0.009791	0.050496	0.010039	0.069857	0.018843	0.041606	0.005887	0.036146	0.005167
19	8	И6	0.50758	0.250156	0.286424	0.047216	0.192582	0.04576	0.009718	0.050407	0.008104	0.051233	0.015456	0.032477	0.004138	0.025994	0.003115
19	9	И4	0.804879	0.27071	0.27155	0.051549	0.215503	0.052303	0.006994	0.06076	0.01073	0.071457	0.021058	0.051198	0.006706	0.045553	0.006971
19	10	И4	0.88077	0.304657	0.294586	0.057091	0.235753	0.053144	0.007145	0.073386	0.011797	0.081199	0.022668	0.054811	0.007492	0.04911	0.00744
19	11	И4	0.768726	0.232359	0.227061	0.043993	0.188597	0.042243	0.006955	0.05437	0.010272	0.065766	0.019709	0.049657	0.006269	0.038678	0.006165

Примечание. Литологические типы (ЛТ): Д — микрокристаллический доломит, И3 — известняк пелитоморфный, обогащенный органическим веществом, И4 — известняк пелитоморфно-шламовый со спикулами губок, И6 — известняк органогенно-обломочный. Образцы пронумерованы сверху вниз.

Note. Lithological types (ЛТ): Д — microcrystalline dolomite, И3 — mudstone with organic matter content, И4 — wackstone with sponge spicules, И6 — bioclastic grainstone. Samples are numbered from top to bottom.

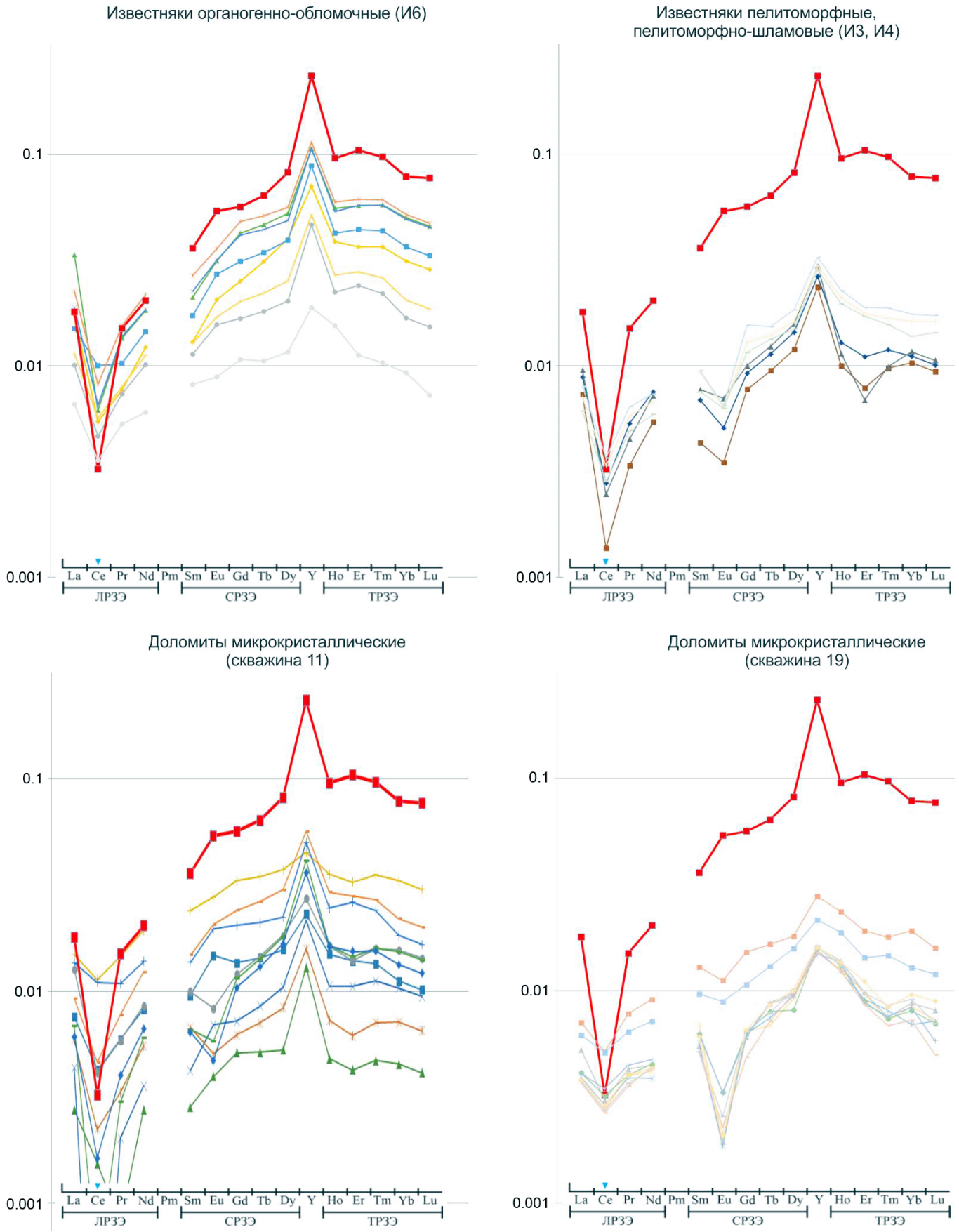

Рис. 3. Распределение редкоземельных элементов и иттрия (нормировка на PAAS) в известняках и доломитах каширского горизонта. Красной жирной линией для сравнения показаны значения содержания элементов в поверхностных водах Тихого океана (Zhang, Nozaki, 1996), умноженные на 10^6

Fig. 3. Distribution of rare earth elements and yttrium (normalized to PAAS) in limestones and dolomites of the Kashira horizon. The red thick line for comparison shows the values of the element content in the surface waters of the Pacific Ocean (Zhang, Nozaki, 1996), multiplied by 10^6

Табица 2. Значения $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в образцах микрокристаллических доломитов каширского горизонта
Table 2. $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ values in samples of microcrystalline dolomites of the Kashira horizon

Скважина Borehole	№ обр Sample No.	$\delta^{13}C$ (‰, PDB)	$\delta^{18}O$ (‰, SMOW)	$\delta^{18}O$ (‰, PDB) (пересчет) (recalculated)
11	30	5.3	33.8	2.8
11	33	5.9	32.8	1.9
11	36	6.0	32.8	1.8
12	121	5.7	31.2	0.2
12	1043	5.8	31.5	0.6

морской воды палеобассейна (рис. 3, скважина 11). В целом образцы первой группы имеют хорошую сходимость и по конфигурации диаграмм близки к характеристикам современной морской воды и органогенно-обломочных известняков, отличаясь более выраженной отрицательной Ce-аномалией. Вторая группа доломитов характеризуется выраженной отрицательной Eu-аномалией и пологими спектрами РЗЭ (рис. 3, скважина 19). Ввиду того, что такие спектры получены из всех образцов доломитов одной скважины, вероятнее всего, доломиты второй группы изменены вторичными процессами и непригодны для фациальных или «редокс»-реконструкций, хотя внешне они ничем не отличаются от первых.

Принимая во внимание лишь первую группу доломитов, распределение спектров РЗЭ можно рассматривать как доказательство первичной седиментационной природы микрокристаллических доломитов каширского горизонта.

Значения и $\delta^{18}O$ в микрокристаллических доломитах (таб. 2) варьируют в диапазоне 31.54–33.83 (‰, SMOW), 0.6–2.83 (‰, PDB), довольно существенно отличаясь в разных скважинах, тогда как значения $\delta^{13}C$ по пяти изученным образцам лежат в узком диапазоне 5.33–5.99 (‰, PDB). Пересчет значений $\delta^{18}O$ в ‰, PDB проведен по формуле:

$$\delta^{18}O_{VPDB} = 0{:}9700\ \delta^{18}O_{SMOW} - 29{:}99\ \%$$

(Clark and Fritz, 1997).

Вероятно, достаточно высокие значения $\delta^{13}C$ в доломитах являются результатом ферментации органического вещества и активного метаногенеза (Hoefs, 2009). $\delta^{13}C$ чувствителен к биогенному углекислому газу, поэтому его повышенные значения могут объясняться высокой продуктивностью органики (Calvo, 1995). По значениям $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ на диаграмме распределения стабильных изотопов углерода и кислорода в «органогенных» доломитах (Mazzullo, 2000) изученные образцы занимают область «метаногенных» мелководных доломитов. Если предположение о метаногенезе верно, то следует рассмотреть возможные источники первичного органического вещества в осадке, учитывая полное отсутствие реликтов фауны.

Строение сепиолитов

При изучении доломитов на растровом электронном микроскопе во всех образцах отмечается характерная особенность — повсеместное наличие сепиолитов, которые распространены в виде нанометровых нитей, окутывающих кристаллы и занимающих межкристаллическое пространство, а также в виде пленок на границах пустот шаровидной и трубчатой форм (рис. 4).

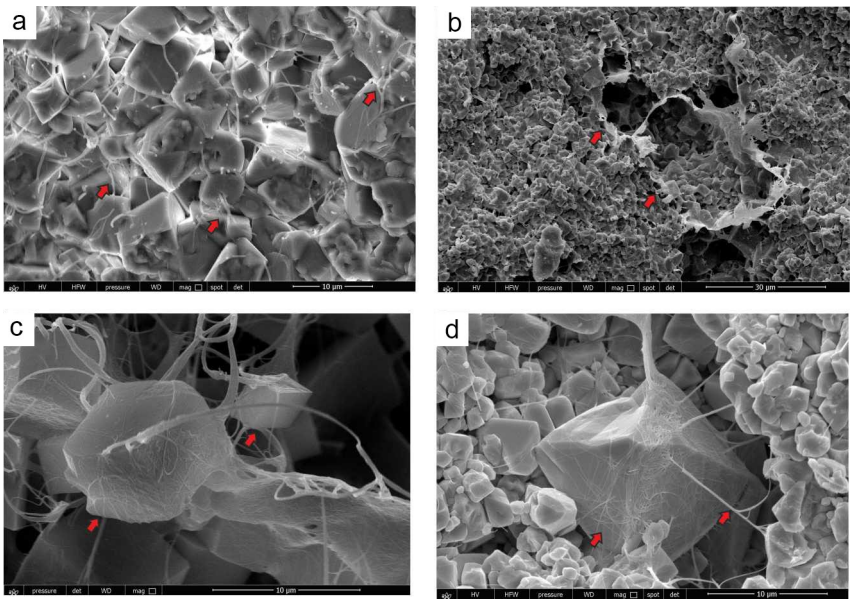

Рис. 4. Доломиты и сепиолиты (изображения РЭМ): a — нити сепиолитов (стрелки), развитые между кристаллами доломита; b — пленки сепиолитов (стрелки), развитые по границам пустот в доломите; c — кристаллы галита (стрелки), «подвешенные» на нитях сепиолита; d — кристалл доломита, окутанный плотной сетью из нитей сепиолита

Fig. 4. Dolomites and sepiolites (SEM images): a — sepiolite threads (arrows) developed between dolomite crystals; b — sepiolite films (arrows) developed along the boundaries of voids in dolomite; c — halite crystals (arrows) «suspended» on sepiolite threads; d — dolomite crystal enveloped in a dense network of sepiolite threads

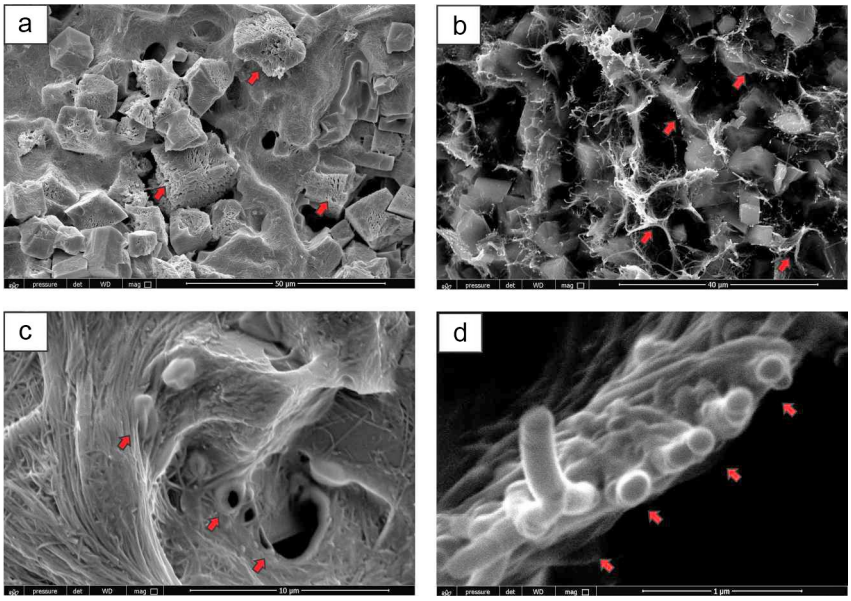

Рис. 5. Изображения РЭМ образцов после травления соляной кислотой: a — решетчатая структура кристаллов доломита (стрелки); b — «сотовая» структура сепиолитовых пленок (стрелки); c, d — бактериоморфы сепиолитового состава (стрелки)

Fig. 5. SEM images of samples after etching with hydrochloric acid: a — lattice structure of dolomite crystals (arrows); b — honeycomb-like structure of sepiolite films (arrows); c, d — bacteriomorphs of sepiolite composition (arrows)

Развиты они относительно равномерно. Не отмечается лишь их повышенное содержание или изменение морфологии вблизи уровней палеопочв. Тем не менее в самих палеопочвах содержатся сепиолиты отличной морфологии в более высоких концентрациях. Следует также отметить, что сепиолиты отсутствуют в известняках, залегающих непосредственно ниже и выше пачек доломитов. Микрозондирование участков скопления сепиолитов ряда образцов показало наличие в их составе кроме Mg и Si также незначительной примеси K, Al.

В породах встречаются кристаллы доломита и галита, «подвешенные» на нитях сепиолита в межкристаллическом пространстве без опоры на смежные кристаллы (см. рис. 4, c), что позволяет интерпретировать их как сингенетичные образования. Кристаллы галита, вероятно, сохранились от растворения при бурении, распиловке керна и пробоподготовке именно благодаря окутывающим их сепиолитовым нитям.

Для более детального изучения морфологии сепиолитов был проведен эксперимент с частичным растворением доломитовой составляющей и последующим исследованием на растровом электронном микроскопе. Наилучшие результаты дало растворение образцов в 10% соляной кислоте при температуре 80–100 °C в течение 30–40 минут. Более высокие температуры и более концентрированная кислота не применялись во избежание изменения структуры сепиолитов.

После растворения основной части доломита проявились многочисленные бактериоморфы нанометрового масштаба (рис. 5, c, d). В отдельных образцах проявились «сотовые» структуры, характерные для гликокаликса (Tomas et al., 2013), — каждый растворенный кристалл доломита находился в «индивидуальной ячейке» (рис. 5, b). Изучение частично растворенных кристаллов доломита позволило выявить важную особенность: нити сепиолита пронизывали кристаллы доломита насквозь, а сами кристаллы доломита приобрели решетчатую структуру (рис. 5, a). Последний факт говорит о химической неоднородности кристаллов доломита, проявленной в результате селективного выщелачивания. Вероятно, в момент образования они представляли собой сростки кристаллов значительно меньшего размера (нанокристаллов).

Результаты и обсуждение

Описанные особенности строения доломитов и сепиолитов указывают на участие в их образовании микробиальных сообществ. Наличие эвапоритовых минералов, а также отсутствие фаунистических остатков связано, вероятно, с их образованием в полуизолированных водоемах с повышенной соленостью. В таких неблагоприятных для жизни условиях могли существовать только неприхотливые микробиальные сообщества.

Чаще всего микробиальные образования ассоциируются со строматолитами и подразумевают тонкослоистую текстуру, тогда как каширские доломиты преимущественно массивны, а слоистые разности не имеют ничего общего со строматолитовой наслоенностью. В опубликованной работе об образовании современных доломитов в Петуховском содовом озере с участием альгобактериальных сообществ (Самылина и др., 2016) приведено следующее описание среды осадконакопления современных доломитовых осадков: «Фототрофные сообщества, эдификатором которых является C. circinnatus, представляют собой плавающие в воде скопления мелких „агрегатов“, в которых среди обильно ветвящихся трихомов C. circinnatus массово развиваются цианобактерии, бактерии, диатомовые и некоторые другие водоросли. Такие сообщества не образуют плотных матов, а напротив, представляют собой рыхлую биомассу». Приведенная характеристика среды как нельзя лучше подходит для объяснения накопления массивных доломитов, высокая пористость которых может быть связана с высокой скоростью кристаллизации, а также растворением и

удалением из осадка значительных объемов органического вещества и гипса, свидетельства чему приведены выше. В той же работе о «микробиальных» доломитах Петуховского карьера указано, что околоклеточный экзополисахарид (ЭПС) минерализован в первую очередь магнием и кремнием, но практически не содержит кальция.

Нельзя не отметить морфологическое сходство сепиолитовых образований с нитевидными формами бактерий, обнаруживаемых в микробиально-индуцированных доломитах современных водоемов (например, Van Lith et al., 2003). По данным многочисленных исследований карбонатных пород и современных карбонатных осадков, содержащих следы микробиальной активности, большинство биопленок имеют в своем составе Si, Mg, часто они содержат также K, Al, Fe. Опубликованные исследования механизмов микробиального породообразования на примере ооидов (Pacton et al., 2012, Antoshkina, 2018) убедительно доказывают, что непосредственно перед кристаллизацией микробиально-индуцированных карбонатов происходит разложение гликокаликса до аморфного магнезиального силиката. Таким образом, магнезиальные силикаты — сепиолиты — в доломитах московского яруса можно рассматривать как фоссилизированные микробиальные нити. В опубликованной литературе встречаются примеры интерпретации генезиса сепиолитов в парагенезе с доломитами в современных водоемах и в ископаемых отложениях как результат микробиального породообразования (Leguey et al., 2010, Del Buey et al., 2018 и др.).

По региональным данным, а также по результатам исследования палеопочв в каширское и подольское время на изучаемой территории господствовал семиаридный климат. Парагенез сепиолитов и доломитов часто интерпретируют как характерную составляющую отложений эфемерных (плайевых) озер в условиях семиаридного и аридного климата. Куэвас с соавторами (Cuevas et al., 2011) в результате проведенных комплексных исследований миоценовых отложений Мадридского бассейна интерпретирует доломиты с сепиолитами как микробиально-индуцированные отложения эфемерных озер при семиаридном климате, называя необходимым условием для соосаждения этих минералов значительные колебания щелочности в водоеме.

Вероятно, парагенез доломитов и сепиолитов московского яруса является свидетельством бактериального породообразования, а благоприятная среда для такого парагенеза обусловлена палеогеографическим и палеоклиматическим факторами. Источником кремнезема для образования сепиолитов могли служить зерна кварца и полевых шпатов эолового генезиса, растворенные в щелочной среде. Реликты таких растворенных зерен часто встречаются в доломитах при изучении их на электронном микроскопе.

Современное накопление «первичных» доломитов можно видеть в относительно небольших по площади изолированных водоемах с повышенной соленостью: себхах, лагунах, плайях, содовых озерах. Однако для интерпретации условий образования отложений палеозоя и докембрия, где распространены пластовые тела микрокристаллических доломитов, выдержанные на сотни километров по латерали, принцип актуализма применим лишь частично.

Существование в палеозойскую эру эпиконтинентальных мелководных морей, занимавших огромные площади и оставивших в геологической летописи выдержанные тонкослоистые отложения, принято объяснять меньшим расстоянием между Землей и Луной по сравнению с современным (Кузнецов, Журавлева, 2019). Как же дать правильное определение палеогеографической зоне в эпиконтинентальном море, где могли формироваться изучаемые микрокристаллические доломиты? Эта зона занимает значительную площадь и характеризуется ограниченной циркуляцией вод (с чем связана повышенная соленость) и постепенным переходом к морю с нормальной соленостью.

При интерпретации обстановок накопления ископаемых доломитовых тел чаще всего применяют термины «плайя», «себха» и «лагуна», в толковании которых отмечается некоторая путаница (Briere, 2000). Плайя (по определению П. Р. Бриере) — это внутриконтинентальный водоем с отрицательным водным балансом, не связанный с морем. Лагуна подразумевает наличие барьера (рифа или косы), отделяющего водоем от открытого моря (Геологический…, 2011). Термин «себха» применим преимущественно к субаэральным прибрежным обстановкам, где происходит накопление эвапоритовых отложений (в геологическом словаре приводится как синоним термину «плайя»).

Как видно, ни одно из рассмотренных определений не подходит для описания обстановки накопления доломитов московского яруса. Эпиконтинентальное мелководное море, простиравшееся на несколько тысяч километров, имело выровненный рельеф дна, что обусловило выдержанность литологически однородных пластов. Зона накопления доломитов, вероятно, находилась в наиболее мелководной части бассейна, в которой был нарушен свободный водообмен с открытым морем при регрессии. Возможно, затрудненный водообмен был связан со сложной системой малоамплитудных баров, которые постепенно гасили приливные волны на протяжении многих километров мелководного моря с крайне низкими углами наклона. Линейная зона баров, которые могли изолировать «лагуну» от открытого моря в каширских и подольских отложениях, не фиксируется ни по материалам сейсморазведки МОГТ-3Д, ни по скважинным данным. Таким образом, в древних эпиконтинентальных морях могли существовать специфические области с затрудненным водообменом большой площади, не ограниченные «барьером».

Заключение

Парагенез доломитов и сепиолитов в отложениях московского яруса является результатом бактериального породообразования в особых условиях среды, обусловленных сочетанием палеогеографического и палеоклиматического факторов. Вероятно, микробные сообщества могли образовывать не только строматолитоподобные слоистые карбонатные породы, но и массивные первичные доломиты. Заслуживает внимания тот факт, что эти доломиты служат коллекторами для нефти и обладают относительно высокими фильтрационно-емкостными свойствами, что обычно нехарактерно для микрокристаллических пород.

Результаты анализа распределения РЗЭ и Y показывают пригодность седиментационных доломитов для фациальных и «редокс»-реконструкций, что особенно актуально для отложений докембрия, в которых отсутствуют фаунистические остатки, а доломиты слагают мощные выдержанные толщи.

Обстановки осадконакопления в эпиконтинентальных морях палеозоя и докембрия могли существенно отличаться от современных, что ограничивает применение принципа актуализма. Доломиты каширского и подольского горизонтов могли быть образованы в наиболее мелководной зоне моря с затрудненным водообменом, не ограниченной полосой рифов, косами или сушей. Такая палеогеографическая зона не может быть описана актуалистическими терминами «плайя», «себха», «лагуна» и т. д. Поэтому при определении древних обстановок осадконакопления необходимо учитывать все особенности среды, характерные для конкретного геологического этапа.

Литература / References

Виссарионова А. Я. Каменноугольные отложения Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. М.: Недра, 1975. 263 с.

Vissarionova A. Ya. Carboniferous deposits of the Volga-Ural oil and gas province. Moscow: Nedra, 1975, 263 p. (in Russian).

Геологический словарь. В 3 т. 3-е изд., перераб. и доп. / Гл. ред. О. В. Петров. Т. 2. К–П. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2011. 480 с.

Geological Dictionary. In three volumes. Third edition, revised and enlarged. Ed.-in-chief O. V. Petrov. Vol. 2. K–P. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2011, 480 p. (in Russian).

Кузнецов В. Г., Журавлева Л. М. Пустотное пространство карбонатных тайдалитов — палеоклиматический аспект // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 4. С. 351–363. DOI: 10.31857/S0024-497X20194351-363

Kuznetsov V. G., Zhuravleva L. M. Pore space in carbonate tidalites: paleoclimatic aspect. Lithology and Mineral Resources, 2019, V. 54, No. 4, pp. 320-332. (in Russian).

Мирнов Р. В., Алексеева Т. В. Палеопочвы в отложениях каширского горизонта на юго-востоке Русской платформы (Республика Башкортостан): характеристика, палеоэкологическая и стратиграфическая значимость // Литосфера. Т. 22. № 5. 2022. С. 694–704. DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-5-694-704.

Mirnov R. V., Alekseeva T. V. Paleosols in the Kashira deposits in the south of the East European Craton (Republic of Bashkortostan): characteristics, paleoecological and stratigraphic significance. Lithosphere, 2022, V. 22, No. 5, pp. 694–704. (in Russian).

Самылина О. С., Зайцева Л. В., Синетова М. А. Участие альго-бактериального сообщества в формировании современных строматолитов в Петуховском содовом озере (Алтайский край) // Палеонтологический журнал. 2016. Вып. 6. С. 92–101. DOI: 10.7868/S0031031X16060131

Samylina O. S., Zaytseva L. V., Sinetova M. A. Participation of algal–bacterial community in the formation of modern stromatolites in cock soda lake, Altai region. Paleontological Journal. 2016, V. 50, No. 6, pp. 635–645 (in Russian).

Хазипов Р. Г., Ступакова А. В. Типы коллекторов каширского горизонта среднего карбона в пределах Мелекесской впадины и Южно-Татарского свода // Георесурсы. 2017. Т. 19. № 3. Ч.2. С. 250–254. DOI: 10.18599/grs.19.3.16

Khazipov R. G., Stoupakova A. V. Reservoir Types of the Kashirian Horizon of the Middle Carboniferous within the Melekess Depression and the South Tatar Arch. Georesursy, 2017, V. 19, No. 3, pp. 250–254 (in Russian).

Antoshkina A. I. Bacteriomorph Structures in Nodules, a Characteristic of Euxinic Conditions of Nodule Formation. Paleontological Journal. 2018. Vol. 52. № 10. P. 28–39. DOI: 10.1134/S0031030118100040

Briere P. R. Playa, playa lake, sabkha: proposed definitions for old terms. Journal of Arid Environments. 2000. № 45. P. 1–7. DOI:10.1006/JARE.2000.0633.

Clark I. D., Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrology. 1997. New York: Lewis Publishers. 328 p.

Cuevas J., Leguey S., Ruiz A. I. Evidence for the Biogenic Origin of Sepiolite. Developments in Clay Science. 2011. Vol. 3. P. 219-238. DOI:10.1016/B978-0-444-53607-5.00009-8

Del Buey P., Gabestrero O., Arroyo X., Sanz-Montero M. E. Microbially induced palygorskite-sepiolite authigenesis in modern hypersaline lakes (Central Spain). Applied Clay Science. 2018. Vol. 160. P. 9-21. DOI:10.1016/J.CLAY.2018. 02.020

Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry. Sixth Edition. 2009. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 293 p. DOI:10.1007/978-3-319-78527-1

Kirkham A. Patterned dolomites: microbial origins and clues to vanished evaporates in the Arab Formation, Upper Jurassic, Arabian Gulf. Geological Society, London, Special Publication. 2004. Vol. 235. P. 301–308. DOI:10.1144/GSL.SP.2004.235.01.12

Leguey S., Cuevas J., Ruiz A.I., Ruiz Leon D. The role of biomineralization in the origin of sepiolite and dolomite. American Journal of Science. 2010. Vol. 310. P. 165–193. DOI:10.2475/03.2010.02

Mazzullo S. Organogenic Dolomitization in Peritidal to Deep-Sea Sediments. Journal of Sedimentary Research. 2000. №70. P. 10-23. DOI:10.1306/2DC408F9-0E47-11D7-8643000102C1865D

Pacton V., Ariztegui D., Wacey D., Kilburn M.R., Rollion-Bard C., Farah R., Vasconcelos C. (2012) Going nano: A new step towards understanding the processes governing fresh water ooid formation. Geology. 40(6), P. 547-550. DOI:10.1130/G32846.1

Tomás S., Homann M., Mutti M., Amour F., Christ N., Immenhauser A., Agar S. M., Kabiri L. Alternation of microbial mounds and ooid shoals (Middle Jurassic, Morocco): Response to paleoenvironmental changes. Sedimentary Geology. 2013. Vol. 294. p. 68–82.

Van Lith Y., Warthmann R., Vasconcelos G., Mckenzie J. A. Microbial fossilization in carbonate sediments: a result of bacterial surface involvement in dolomite precipitation. Sedimentology. 2003. Vol. 50. P. 237–245. DOI: 10.1046/j.1365-3091.2003.00550.x

Zhang J., Nozaki Y. Rare earth elements and yttrium in seawater: ICP-MS determinations in the East Caroline, Coral Sea, and South Fiji basins of the western South Pacific Ocean. Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. Vol. 60. P. 4631–4644. DOI:10.1016/S0016-7037(96)00276-1

Поступила в редакцию / Received 10.09.2024

Арктический вектор геологических исследований
Arctic vector of geological research

УДК 553.7:504.4 (470.1)
DOI: 10.19110/geov.2024.10.2

Минеральные источники Янейтывисского месторождения минеральных подземных вод (Республика Коми)

Т. П. Митюшева
Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
mityusheva@geo.komisc.ru

В районе Янейтывисского месторождения минеральных подземных вод на гряде Чернова опробованы три группы источников с минерализацией 2.3–3.0 г/л и поверхностные воды. Месторождение минеральных вод наиболее крупное по разведанным запасам в Арктической зоне России, не эксплуатируется. Воды источников субкриогенного нижнекаменноугольного водоносного комплекса слабощелочные, маломинерализованные, хлоридные кальциево-натриевые. Установлено изменение анионного состава вод при постоянстве гидрохимического ClCa-типа. Впервые изучен изотопный состав вод Янейтывисского источника (δD –111.9…–109.2 ‰ (SMOW), $\delta^{18}O$ –15.78…–15.15 ‰ (SMOW), по значениям они близки термоминеральным водам источников на р. Пымвашор на гряде Чернышева. В формирование состава минеральных вод источников различный вклад вносят пресные воды современных атмосферных осадков, сформированные в условиях холодного климата, и талые воды от деградирующей многолетнемерзлой толщи, а также соленые хлоридно-натриевые воды морского (смешанного) генезиса водоносного комплекса карбонатных отложений нижнего карбона. Поверхностные воды Большеземельской тундры в районе источников имеют разнообразный состав (HCO_3 Ca–Mg, HCO_3–Cl Ca–Na, Cl Na–Ca, Cl–HCO_3 Mg), установлено их загрязнение микроэлементами природного и техногенного происхождения.

Ключевые слова: *источник, подземные воды, минеральные воды, гидрохимия, изотопный состав, гряда Чернова*

Mineral springs of the Yaneytyvis deposit of mineral waters (Komi Republic)

T. P. Mityusheva
Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

In the area of the Yaneytyvis deposit of mineral waters on the Chernov Ridge, three groups of springs with mineralization of 2.3–3.0 g/l and surface waters were tested. The mineral water deposit, the largest in terms of proven reserves in the Arctic zone of Russia, is not exploited. The mineral waters of the springs of the subcryogenic Lower Carboniferous aquifer complex are weakly alkaline, low-mineralized, calcium-sodium chloride. A change in the anionic composition of the waters (a decrease in the proportion of sulfate ion) was established with a constant Cl Ca hydrochemical type. The first data were obtained on the isotopic composition of the mineral waters of the Yaneytyvis springs (δD –111.9…–109.2 ‰ (SMOW), $\delta^{18}O$ –15.78…–15.15 ‰ (SMOW), values are close to the thermomineral waters of the springs on the Pymvashor River on the Chernyshev Ridge. Various types of water participate in the formation of the composition of the mineral waters of the springs: fresh waters of modern atmospheric precipitation formed in cold climates and melt waters from degrading permafrost, as well as salty chloride-sodium waters of marine (mixed) genesis of the aquifer complex of carbonate deposits of the Lower Carboniferous. Surface waters of the Bolshezemelskaya tundra in the area of the springs have a diverse composition (HCO_3 Ca–Mg, HCO_3–Cl Ca–Na, Cl Na–Ca, Cl–HCO_3 Mg), their pollution with microelements of natural and technogenic origin has been established.

Keywords: *Yaneytyvis spring, underground water, mineral water, hydrochemistry, isotopic composition, Chernov ridge*

Введение

В пределах узкой сложнопостроенной линейно-складчатой субширотной структуры гряды (поднятия) Чернова (Тектоника…, 1989) в северной части Предуральского краевого прогиба сосредоточены большие ресурсы пресных и минеральных подземных вод, связанные с разновозрастными осадочными палеозойскими отложениями. Здесь находятся (Гидрогеология…, 1970; Лечебно-минеральные…, 1983; Митюшева, 2016) немногочисленные соленые источники: Табейшор, Салаю, Янейтывисский, Воркутские сероводородные. Эти групповые выходы подземных минеральных вод на поверхность в пределах гряды связаны с повышенной трещиноватостью и проницаемостью пород в зонах разрывных нарушений. Степень изучения соленых ключей (родников) севера Предуральского краевого прогиба различна, и большая часть остается малоизученной, несмотря на то, что они известны уже более

Для цитирования: Митюшева Т. П. Минеральные источники Янейтывисского месторождения минеральных подземных вод (Республика Коми) // Вестник геонаук. 2024. 10(358). С. 12–27. DOI: 10.19110/geov.2024.10.2

For citation: Mityusheva T. P. Mineral springs of the Yaneytyvis deposit of mineral waters (Komi Republic). Vestnik of Geosciences, 2024, 10(358), pp. 12–27, doi: 10.19110/geov.2024.10.2

150 лет. Первые особо ценные сведения о сероводородных и соленых источниках около д. Адак привел В. Н. Латкин (1848), о минеральных «теплых и горячих» ключах на правом притоке р. Адзьвы, на речке Пымвашор — архимандрит Веньямин (1849), А. В. Журавский (1906), Н. А. Кулик (1909). Сведения о минеральных источниках гряд Чернова и Чернышева Предуральского прогиба включены в сводки по минеральным водам Коми АССР и Ненецкого национального округа А. А. Скробова и В. И. Смирнова (1939), Е. В. Ртищевой (1953), Е. Д . Соловьевой и Н. Ф. Сергеевой (1962), тома XLII «Гидрогеологии СССР» (1970), Г. Д. Сосновской и М. П. Найшулер (1981), Л. В. Мигунова и др. (1983), В. М. Милькова и др. (1989, 1993).

Благодаря уникальному для Европейского Севера химическому и газовому составу, наиболее исследованы термоминеральные солоноватые (1.7–2.1 г/л) источники гряды Чернышева на р. Пымвашор (Гидрогеология.., 1970; Митюшева и др., 2012), находящиеся в Ненецком автономном округе. Неутвержденные запасы лечебных хлоридно-натриевых питьевых и радонорадиевых бальнеологических вод, приуроченных к зоне трещиноватости закарстованных верхнедевонско-нижнекаменноугольных известняков, составили 2.8 тыс. м^3/сут. Единственным разведанным и состоящим на учете государства (Государственный…, 2023) месторождением минеральных подземных вод (ММПВ) за Северным полярным кругом является Янейтывисское.

Уникальность Янейтывисского ММПВ в том, что этот район находится в зоне развития многолетнемерзлых пород. В области вечной мерзлоты выходы минеральных вод на поверхность известны больше как достопримечательные туристические объекты и «дикие» лечебные места. Примером могут быть многочисленные термальные минеральные источники Чукотки (Поляк и др., 2022). Функционирует в Российской Арктике единственный санаторий «Талая» (287 км от г. Магадан), где для бальнеолечения используются термальные (до +98 °С) азотные кремнистые хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды среднеюрских терригенных и верхнеюрских вулканогенных пород с минерализацией 0.5–0.6 г/л месторождения Тальское-1 (Государственный…, 2023; Завгородько и др., 2020).

Целью работы является характеристика природных источников минеральных вод на площади Янейтывисского месторождения по состоянию на 2021 г., оценка изменения химического состава вод во временном разрезе за полувековой период и возможности использования минеральных вод в современных условиях, уточнение распространенности химических элементов и условий формирования состава минеральных вод источников.

Общие сведения

Янейтывисские минеральные источники и разведанное одноименное месторождение минеральных вод расположены в 30 км от г. Воркуты (рис. 1), в месте слияния рек Янэйтывис (Яней-Ты-Вис) и Воргашор. Источники приурочены к зоне разрывных нарушений — Янейтывисскому взбросу на южном крыле поднятия Чернова.

Первые сведения о солоноватых источниках на устье р. Воргашор были приведены в 1959 г. Л. В. Лобковой и затем Б. М. Зимаковым[1] (1961) был опробован Усть-Воргашорский источник (Воргашорская группа источников) на правом берегу р. Янэйтывис. На участке естественных выходов минеральных вод на поверхность земли инженерно-геологической партией ПГО «Полярноуралгеология» в 1973–1978 гг. были проведены поиски и детальная разведка минеральных вод[2, 3]. Были пробурены скважины № ВК-492, ВК-493, ВК-494, ВК-495 глубиной 89.9; 192; 172 и 502 м соответственно, вскрывшие водоносную зону трещиноватости в карбонатных каменноугольных породах. Работы по разведке минеральных вод проводились по заявке Воркутинского горисполкома в связи с удаленностью от курортов страны и трудностью завоза лечебно-столовых вод из других областей. Потребность в минеральных водах, которые планировалось использовать для розлива, составляла 50 м^3/сут. Запасы лечебно-столовых вод Янейтывисского ММПВ были утверждены в 1978 г. в количестве 1020 м^3/сут (в т. ч. по категориям: А — 482, В — 688 м^3/сут). Согласно переоценке, проведенной в 2019 г. (Протокол ГКЗ от 25.12.2019 г. № 6171) (Государственный…, 2023), ранее утвержденные запасы Янейтывисского ММПВ серпуховско-визейского водоносного комплекса ($C_1s–v$) в интервале залегания 352–502 м были переведены в категорию «C_2» с сохранением объема 1020 м^3/сут.

Климат местности, расположенной в 140 км от побережья Северного Ледовитого океана, характеризуется как субарктический; среднегодовые значения температуры за период 1991–2020 гг. по г. Воркуте — около –4.7 °С, количество осадков — 540 мм (Среднегодовые…, 2024). Абсолютные отметки земной поверхности в данном районе Большеземельской тундры — от 150 до 165 м.

Объекты исследования

Исследования Янейтывисского источника были проведены в июле 2021 г. сотрудниками Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Обследованы три группы холодных минеральных подземных источников (рис. 1, с, табл. 1), выходы которых локализованы на отрезке долины р. Янэйтывис в месте слияния с р. Воргашор.

Отбор проб вод из скважин был невозможен, поскольку они законсервированы (затампонированы).

---

[1] Геохимия газов осадочной толщи полярной части Уральского краевого прогиба: Отчет / М.: МГРИ, 1961. Отв. исполн. Б. М. Зимаков. ГБУ РК «ТФИ РК», Сыктывкар. Инв. № 3120.

Geochemistry of gases of the sedimentary strata of the polar part of the Ural foredeep: Report. Territorial Geological Funds of the Komi Republic, Syktyvkar. Moscow: MGRI, 1961, Exec. B. M. Zimakov, No, 3120 (in Russian)

[2] Отчет по поискам минеральных вод в районе поднятия Чернова: Отчет / Воркута, 1977. Отв. исполн. И. А. Конжин, А. К. Подвальный. ГБУ РК «ТФИ РК», Сыктывкар. Инв. № 4961.

Prospecting for mineral waters in the area of the Chernov Swell: Report Territorial Geological Funds of the Komi Republic, Syktyvkar. Vorkuta, 1977. Exec. I. A. Konzhin, A. K. Podvalny, No. 4961. (in Russian)

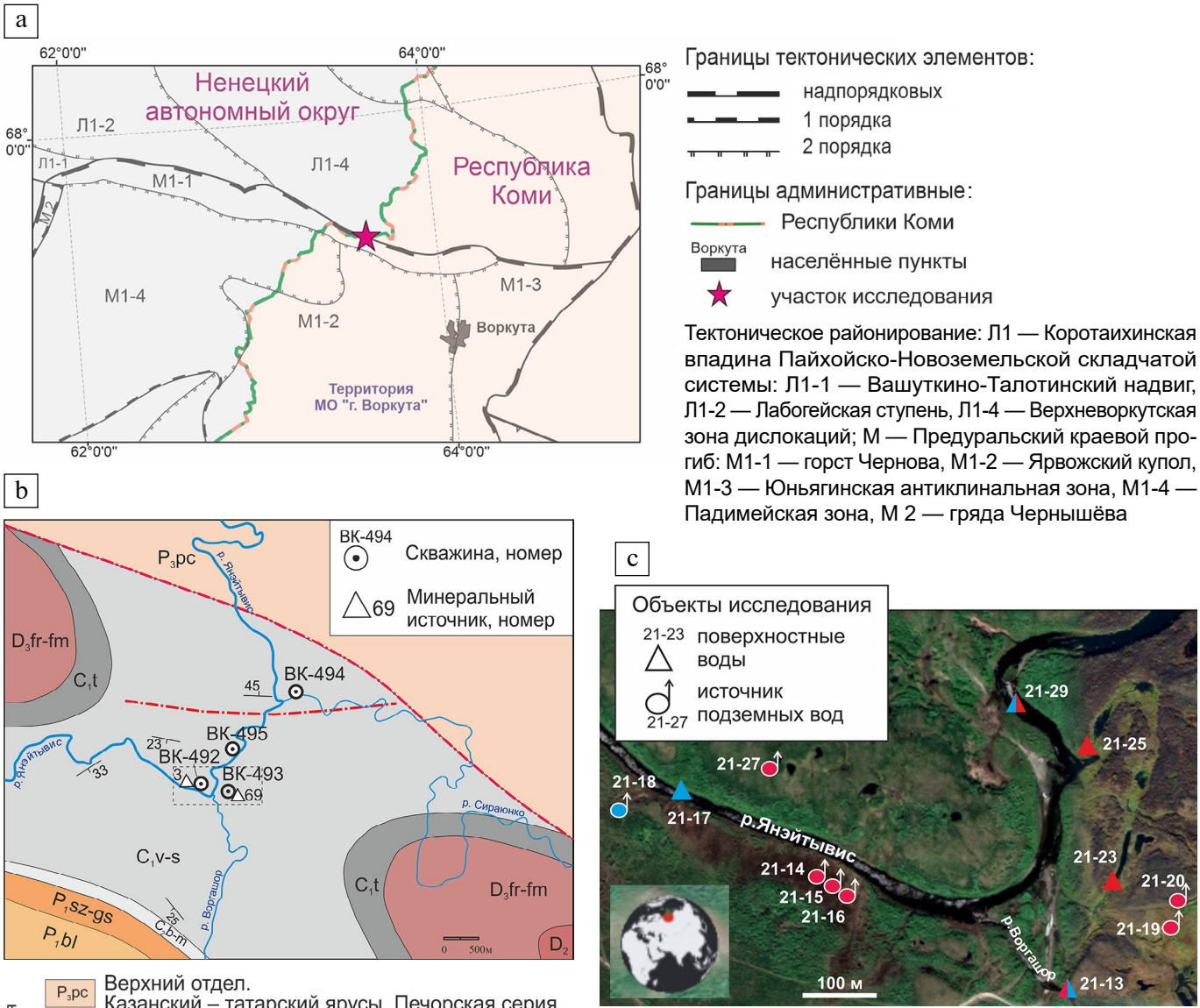

Рис. 1. Местоположение (a, b) и схема опробования подземных и поверхностных вод (c) на площади Янейтывисского месторождения минеральных вод: a — тектоническая схема (Геологическая..., 2007); b — геологическая карта по результатам разведочных работ[3]; c — объекты опробования на космоснимке (Google Earth). Окраска пунктов опробования соответствует анионному химическому составу вод: голубой — гидрокарбонатные, красный — хлоридные

Fig. 1. Location (a, b) and scheme of sampling of underground and surface waters (c) in the area of the Yaneytyvis mineral water deposit: a — a tectonic scheme (Geologicheskaya.., 2007); b — geological map according to results of exploration work; c — the sampling on the satellite image (Google Earth). The color of the sampling corresponds to the anionic chemical composition of the waters: blue — hydrocarbonate, red — chloride

[3] Отчет по детальной разведке минеральных вод в районе поднятия Чернова: Отчет / Воркута, 1978. Отв. исполн. И. А. Конжин, М. Л. Кротов и др. ГБУ РК «ТФИ РК», Сыктывкар. Инв. № 5074.
Report on the detailed exploration of mineral waters in the area of the Chernov Swell. Report. Vorkuta, 1978. Exec. I. A. Konzhin, M. L. Krotov et al. Territorial Geological Funds of the Komi Republic. Syktyvkar. No. 5074 (in Russian)

Первая группа минеральных источников представляет линейный выход подземных вод на правом берегу р. Янэйтывис на высокой пойме в 30–50 м от русла и включает три точки наблюдения (далее — т. н.): 21–14, 21–15 и 21–16. Между этими источниками 10–20 м. Площадка выходов подземных вод заболочена, под дерново-растительным слоем залегает прослой (6 см) супеси серо-коричневой на серых глинах с галькой. Вода источников солоноватая, имеет выраженный железистый привкус. Координаты и параметры, определенные при полевых работах приведены в таблице 1.

Вторая группа минеральных источников находится на второй надпойменной террасе р. Янэйтывис в 240 м от устья р. Воргашор (670 м от источников 1 группы). Подземные воды разгружаются в виде грифонов с общим дебитом более 10 л/с (т. н. 21-19) и скапливаются в водоеме 1.5 × 1.5 м. Далее происходит сток этих солоноватых вод по склону в старичное озеро (т. н. 21-23) размером 80 × 10 м у основания террасы в 80 м от реки. В 30 м от т. н. 21-19 находится другой высокодебитный источник (групповой выход) (т. н. 21-20), вода накапливается в водоеме 1.5 × 1.5 м. Этот источник (рис. 1, c) в период разведочных работ был оборудован, здесь осуществлялись режимные наблюдения (рис. 1, b — ист. 69). Ранее именно он именовался как Усть-Воргашорский. Законсервированная скважина ВК-493 находится в 20 м от т. н. 21-20. По всей длине поверхностного стока (ручейка) от источника наблюдаются многочисленные выходы подземных газирующих вод. Водоток от источника разгружается в старичное озеро, которое большей частью заболочено; в открытых участках водоема электропроводимость вод достигает 4.46 См/см. Длина стока от минеральных источников до реки 500–550 м. Водоток, втекающий в реку, имеет общий расход 12 л/с (1002 м^3/сут), он вытекает из старичных озер, собирающих стоки минеральных вод от источников. Точка наблюдения 21-25 характеризует место впадения водотока шириной 60 см в р. Янэйтывис. В целом окружающая местность на террасе сильно заболочена, отмечаются многочисленные озерца различного размера с пресной или слабоминерализованной (удельная электропроводимость до 2.5 См/см) водой.

Третья группа минеральных источников находится на левом борту р. Янэйтывис в 50–80 м от реки. Здесь на заболоченной площадке поймы воды скапливаются в нескольких водоемах различного размера, электропроводимость различна: 0.7–3.7 См/см. Один из крупных выходов минеральных вод возник на месте ликвидированной скважины ВК-492. Отобрана проба вод (т. н. 21-27) из высокодебитного родника, на котором в период разведочных работ осуществлялись режимные наблюдения. Дебит ист. 3 (рис. 1, b) в 1977–78 гг. был 1.2 л/с.

Пресные подземные воды участка обследований характеризует проба из источника (т. н. 21-18) на правом берегу р. Янэйтывис. Восходящий единичный выход подземных вод осуществляется в 100 м от реки, он отличается низкими значениями температуры и минерализации вод (табл. 1).

Речные воды на данном участке отобраны из р. Янэйтывис и ее правого притока р. Воргашор с глубины 0.2–0.3 м от поверхности. Река Янэйтывис является правым притоком р. Воркуты (бассейн р. Печоры), берет начало ≈ в 8 км из о. Янэйты. Она имеет выраженную долину, ширина русла 6–10 м, глубина от 20 см в районе переката и до 3 м. После впадения р. Воргашор русло реки меняет направление почти на 90 градусов (рис. 1, b, c). Две пробы характеризуют реку: выше по течению исследованных источников третьей группы (т. н. 21-17) и ниже стока минерализованных вод (т. н. 21-29). Отбор пробы воды из р. Воргашор (т. н. 21-13) произведен на 200 м выше устья; ширина русла 5 м, глубина не более 30 см.

Материалы и методы исследований

В работе представлены результаты изучения природных вод в районе Янейтывисского ММПВ. В полевых условиях температуру и удельную электропроводимость поверхностных и подземных вод измеряли

Таблица 1. Объекты исследования природных вод

Table 1. Objects of natural water research

	Объект исследования Research object	Номер образца* Sample number*	Координаты Coordinates		t, °C	Электропроводимость, См/см Electrical conductivity, S/cm
			N	E		
Подземные воды Underground water	1-я группа минеральных источников 1st group of mineral springs	21-(14-16)	67°41’28.8’’	63°42’35.0’’	3.5–3.7	1.91–4.95
	2-я группа минеральных источников 2nd group of mineral springs	21-19	67°41’28.2’’	63°42’11.7’’	5.6	4.59
		21-20	67°41’29.1’’	63°42’13.2’’	5.2	4.56
	3-я группа минеральных источников 3rd group of mineral springs	21-27	67°41’32.5’’	63°41’37.7’’	3.0	3.68
	пресный источник / fresh water spring	21-18	67°41’32.0’’	63°41’15.0’’	1.8	0.29
Поверхностные воды Surface waters	р. Воргашор / Vorgashor river	21-13	67°41’23.9’’	63°42’01.2’’	15.5	0.47
	р. Янэйтывис Yaneytyvis river	21-17	67°41’31.5’’	63°41’32.3’’	16.2	0.09
		21-29	67°41’36.4’’	63°41’58.7’’	15.7	0.23
	озеро старичное / oxbow lake	21-23	67°41’35.1’’	63°42’25.7’’	16.5	1.8
	водоток из старичных озер water flow from oxbow lakes	21-25	67°41’35.9’’	63°42’04.0’’	13.0	3.75

Примечание. * — номер образца соответствует номеру на рис. 1, c.
Note. * — the sample number corresponds to the number in Fig. 1, c.

тестером HI 98129/98130 (Hanna Instruments, Португалия). Отбор проб воды осуществлялся в пластиковые контейнеры (после предварительного ополаскивания не менее трех раз отбираемой для анализа водой) после фильтрования через фильтр производства фирмы Schleicher & Schuell (Германия) с размером пор 0.45 мкм. Для определения общего химического состава объем пробы составлял 1.0 л, микроэлементного — 15–50 мл. Консервация для исследования катионов и микроэлементов производилась по стандартным методикам концентрированной HNO_3. Пробы вод для изучения изотопного состава ($\delta^{18}O$ и δD) были отобраны в пластиковые контейнеры объемом 10–15 мл.

Определение макрокомпонентного состава вод проведено в экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар) в соответствии с аттестованными методиками: HCO^-_3 — методом концентрации ионов, Cl^- — методом потенциометрического титрования; SO^{2-}_4 — турбидиметрическим методом; NH_4^+ и NO_3^- — фотометрическим методом; Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+ — на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Spectro CIROS CCD (Германия). Сухой остаток определен гравиметрическим методом, величина pH — потенциометрическим. Общий органический углерод — по методу NPOC, TOC — по методу термокаталитического окисления. Концентрации 64 элементов анализировались методами ICP-MS и ICP-OES на приборах: масс-спектрометре Agilent 7700x (Agilent Technologies, США) и оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Vista MPX Rad (Австралия) в Центре коллективного пользования «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Анализ изотопного состава вод ($\delta^{18}O$, δD) проведен в ЦКП Геологического института РАН (Москва) на приборе Picarro 2140i (лазерный анализатор изотопного состава O и H).

Название химического состава вод приведено по составу основных анионов и катионов, содержания которых превышают 20 %-экв. в возрастающем порядке.

Оценка пластовых температур формирования солевого состава вод проводилась по гидрохимическим геотермометрам, которые возможно применять для относительно низких температур: *SiO_2, Na-Li, K-Mg*. Для расчета использовались результаты химического анализа воды, выраженные в мг/л. Расчеты температуры по SiO_2-геотермометру для диапазона температур 25–250 ºС производились по формуле: T °C = 1522/(5.75 — lgSiO_2) — 273.15 (Fournier, 1977). K-Mg-геотермометр (Giggenbach, 1988) используется для гидротермальных систем с температурой 50–300 °C: T °C = 4410/14+lg(K^2/Mg) — 273.15. Na-Li-геотермометр разработан для оценки температур пластовых (от 20 до 340 °C) слабо- и умеренно минерализованных вод осадочных бассейнов: T °C = 1000/(lg(Na/Li) — 0.14) — 273.15 (Fouillac, Michard, 1981).

Характеристика гидрогеологических условий

В изучение мерзлотных и гидрогеологических особенностей данной территории поднятия Чернова начиная с 60-х годов XX в. внесли вклад А. П. Мельник и Ю. В. Николаев (1961), И. Г. Соловьев (1962), О. П. Овчинников (1967), Н. Г. Оберман (1969) и другие исследователи. Наиболее полные данные о геологическом строении Янейтывисского ММПВ были получены при поисково-разведочных работах 1973–1978 гг., направленных на оценку запасов минеральных вод[2, 3]. Опираясь на результаты работ этих исследователей мы приводим краткую гидрогеологическую характеристику подразделений данного участка исследований, входящего в соответствии с районированием (Государственная..., 2007) в Полярно-Североприуральскую систему артезианских бассейнов (*AII*) (первого порядка). Территория охватывает погруженную часть поднятия Чернова (рис. 1, a, b), осложнена тектоническими нарушениями различной амплитуды, которые являются ответвлениями Янейтывисского взброса «Н». Взброс имеет северо-западное (пай-хойское) простирание, ограничивает гряду с севера, его амплитуда достигает 4 км, образование относят к послетриасовому времени.

Неоген-четвертичный таликово-криогенный водоносный комплекс (N-Q) имеет повсеместное распространение и представлен озерными, ледниковыми, ледниково-морскими, аллювиально-морскими и аллювиальными отложениями различного литологического состава. Комплекс включает грубые валунные суглинки, песчанистые алевриты падимейской серии (ранее — свиты) *(m,gmN_2pd)*; алевриты с галькой и гравием, суглинки с прослойками глин роговской серии *(gm,lgE–Ird)* и аллювиальные иловые пески, песчано-галечные и валунные отложения; озерно-болотные отложения — торф, песок, супесь, суглинок; покровные суглинки неоплейстоцен-голоцена *(a,lpII–H)*. Установленная мощность отложений — от 2 м в зонах распространения карбонатных пород и до 72 м в пойме р. Янэйтывис. Типичный состав вод инфильтрационного генезиса зоны активного водообмена в пределах поднятия Чернова — гидрокарбонатный кальциево-магниевый или кальциево-натриевый с минерализацией 0.1–0.5 г/л. В районе Янейтывисского месторождения, на участках разгрузки минеральных вод, воды неоген-четвертичного водоносного комплекса приобретают хлоридный или гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-магниевый состав, их минерализация возрастает до 0.8 г/л.

Субкриогенный водоносный комплекс отложений нижнего карбона (C_1v-s) (рис. 1, b) включен в Воркутинском районе в объединенные сартъюскую и цементнозаводскую свиты (C_{1-2}*sr+cz)* (Государственная..., 2007). Подземные воды распространены в закарстованных, кавернозных, трещиноватых, серых, мелко- и (реже) среднезернистых известняках, часто окремненных, участками доломитизированных. Отложения вскрыты скважинами на глубинах свыше 9–63.5 м. Мощность залегающих под углом 12° и более пород больше 430 м, простирание — субширотное. Максимальная трещиноватость известняков развита до глубины 100 м и прослеживается до 300 м, где удельные дебиты скважин достигают 3.7 л/с. Ниже по разрезу (до 500 м) снижается трещиноватость, водопроницаемость и удельный дебит становится менее 0.5 л/с. Трещины как пустые, так и залеченные кальцитом, глинистым и песчаным материалом, встречаются гнезда и друзы выщелачивания, заполненные кристаллами кальцита, доломитовой мукой с включениями мелкого щебня и дресвы известняка, кристаллами пирита, лимонита, реже кварца. Установлена высокая (до 30–50 %) кавер-

нозность пород, в скважинах выявлены каверны размером 0.1–0.3 м и до карстовых полостей 5–15 м и более. Коэффициент водопроводимости пород по скв. ВК-495 составил 330 м^2/сут, пьезопроводности — 1.21·10^4 м^2/сут. В скважине ВК-495 в интервале глубин 341–385 м было выявлено три зоны тектонической трещиноватости и дробления, связанные, вероятно, с дизъюнктивами, оперяющими Янейтывисский взброс и служащими каналами для миграции глубинных вод. Разгрузка высоконапорных минеральных вод водоносного комплекса происходит в долинах рек.

В таблице 2 приведены результаты общего анализа подземных вод по данным опробования водоносного комплекса скважинами ВК-492, ВК-493 и ВК-495. Было установлено, что в районе источников сформирована локальная гидрохимическая зональность, минерализация вод увеличивалась с глубиной. Например, в скв. ВК-493 по всему разрезу воды солоноватые: на глубине 52 м — 2.7 г/л, ниже 192 м — до 3.3 г/л. Только в скв. ВК-494 до глубины 160 м воды были пресные — 0.5 г/л, а ниже 172 м — до 1.5 г/л. На остальной территории гряды Чернова солоноватые хлоридно-натриевые минеральные воды распространены на глубинах свыше 500–550 м.

Химический состав трещинно-карстовых минеральных вод карбонатных отложений Янейтывисского ММПВ в период поисково-разведочных работ был сульфатно-хлоридный кальциево-натриевый, солесодержание — 1.5–3.4 г/л на фоне пресных (0.3–0.6 г/л) гидрокарбонатных магниево-кальциевых вод зоны активного водообмена поднятия Чернова. В водах скв. ВК-493 выявлены микрокомпоненты (мг/л): фтор (0.2), бром (2.2–4.8) бор (1.4–4.7), литий (0.12), стронций (2.7), кремниевая кислота (7.8–13.7).

Воды месторождения по действовавшему на то время ГОСТу 2874-73 «Минеральные воды» относились к группе минеральных вод «без специфических компонентов и свойств», с концентрацией биологически активных компонентов ниже установленных норм. В соответствии с полученным в 1978 г. бальнеологическим заключением воды Янейтывисского месторождения (скв. ВК-495, инт. 352–502 м) являлись близким аналогом лечебно-столовой воды «Алма-Атинская» (Курамский источник № 8, Казахстан).

Как было указано, данная территория располагается в зоне развития многолетнемерзлых пород. В пределах Янейтывисского месторождения мерзлота установлена по бортам речных долин от поверхности до глубины 4 м и при удалении от речного русла до 56 м. Многолетнемерзлые породы под долинами рек Янэйтывис и Воргашор отсутствуют (сквозной талик), что обусловлено отепляющим воздействием изливающихся в долине и субаквально напорных подземных минерализованных вод. Была установлена гидравлическая связь р. Янэйтывис с подземными минеральными водами, это обуславливает и фонтанирование скважин в летне-осенний период высокого положения уровня.

Температура подмерзлотных вод колеблется в пределах 1.8–6.2 °С. В скв. ВК-495 по результатам замеров температуры в период разведочных работ величина геотермического градиента росла от 0.4 до 1.4 °С на 100 м. На глубинах свыше 400 м, где отсутствует влияние мерзлоты, геотермический градиент равен 2 °С на 100 м. В скважинах 4-Падимейская и 1-Норейшорская (наиболее близкие по местоположению глубокие скважины, вскрывшие водоносные комплексы каменноугольных и девонских отложений) геотермический градиент на глубинах 1.7–2.4 км возрастает до 2.8–3.3 °С на 100 м.

Результаты исследований и обсуждение

Результаты определения химического состава вод минеральных источников, изученных в 2021 г., приведены в таблицах 2, 3 и на рисунке 2. Для сравнения во временном разрезе показаны данные, полученные ранее, в 1959 и 1977 гг.

Минеральные воды исследованных источников всех трех групп по анионному составу являются хлоридными с повышенным содержанием сульфат-иона (16–17 %-экв.), по катионному — кальциево-натриевыми (рис. 2). Наблюдается превышение концентраций ионов Cl^- над Na^+ более чем в два раза, кальция над магнием Ca/Mg — 3.5–3.6. Концентрация ионов HCO_3^- в водах источников варьирует от 172 до 231 мг/л. В незначительных количествах содержатся NO_3^- (0.01–0.19 мг/л) и NH_4^+ (0–0.15 мг/л).

Общая минерализация вод определена в пределах 2.3–3.0 г/л, что квалифицирует их (ГОСТ Р 54316-2020, Об утверждении.., 2021) как маломинерализованные. Наибольшее солесодержание наблюдается в источниках первой и второй групп (т. н. 21-16, 21-19 и 21-20). Величина pH вод (7.3–7.6) характеризует слабощелочную реакцию среды. По показателю общей жесткости (17.6–24.8 мг-экв/л) воды очень жесткие, что обусловлено прежде всего карбонатным составом водовмещающих пород. Измеренные значения температуры подземных вод источников — 3.4–5.0 °С, что соответствует подгруппе «очень холодные — холодные» (Об утверждении.., 2021) при температуре поверхностных вод — 13.0–16.2 °С.

Опробованный источник 21-20, относимый нами ко 2-й группе минеральных источников, который ранее именовался как Усть-Воргашорский (Геохимия..., 1961)[1] и № 69 (Отчет по детальной..., 1978)[3], имел сульфатно-хлоридный кальциево-натриевый состав и минерализацию 2.8 и 2.6–2.8 г/л соответственно. В 2021 г. минерализация вод источника незначительно (на 50 мг/л) была повышена относительно летних значений 1977 г. Химический состав вод за прошедший период (43 года) исследований (рис. 2) претерпел некоторую трансформацию, которая выражается в уменьшении количества сульфат-иона, и, как результат, сульфатно-хлоридный анионный состав стал хлоридным при сохранении состава основных катионов (Na-Ca). Тип вод не изменился. Содержание иона SO_4^{2-} (в %-экв.) снизилось с 19.9–21.5 до 17.2 (т. н. 21-20) и с 19.7–22.5 до 16.8 (т. н. 21-27). Полагаем, что потеря части растворенного сульфата возможна в результате процессов сульфат-редукции. Необходимо отметить, что на период разведочных работ концентрация иона SO_4^{2-} в водах источников была ниже, чем в скважинах ВК-493 и ВК-495 на глубинах 165–502 м.

Результаты исследования микрокомпонентного состава вод (табл. 3) показали обогащенность рядом микроэлементов в концентрациях более 0.1 мг/л: Si≥Sr>B>Mn≥Fe>Li>Ba. В водах также выявлены (мкг/л): 1–10·n (Pd, Cr, V, Al, Rb, Ni, Cu, Co) и 0.1–1·n (Pb, Mo, U, Y, Cs, Rh, La, Ce, Pr, Eu, Lu, Tm).

Таблица 2. Физико-химическая характеристика подземных минеральных вод

Table 2. Physicochemical characteristics of mineral groundwater

Параметры Parameters	Группы минеральных источников / Groups of mineral springs									
	1-я группа 1st group	2-я группа минеральных источников 2nd group of mineral springs				3-я группа 3rd group		Подземные воды нижнекаменноугольного водоносного комплекса (Отчет по детальной..., 1978)[3] Groundwater of the Lower Carboniferous aquifer complex (Report of the detailed..., 1978)[3]		
	Точки наблюдения / Observation points									
	21-16 17.07.2021	21-19 17.07.2021	21-20 17.07.2021	Усть-Воргашорский (Геохимия..., 1961)[1] 19.09.1959 Ust-Vorgashor (Geochemistry..., 1961)[1]	69 режимный (Отчет по детальной..., 1978)[3] 21.07.1977 69 regime (Report of the detailed..., 1978)[3]	21-27 18.07.2021	3 (Отчет по детальной..., 1978)[3] 21.07.1977 3 (Report of the detailed..., 1978)[3]	скважина ВК-495 инт. 352–502 м 31.05.1978 well VK-495 int. 352–502 m	скважина ВК-493 инт. 165–192 м 18.07.1977 well VK-493 int. 165–192 m	скважина ВК-492 инт. 14.5–98.9 м 18.07.1977 well VK-492 int. 14.5–98.9 m
pH	7.6	7.5	7.3	7.4	7.45	7.4	7.5	7.2	7.05	7.0
минерализация, мг/л Mineralization, mg/l	2964.1	2963.4	2913.9	2851.27	2765.68	2306.1	2676.2	3290.91	3435.61	2892.03
сухой остаток, мг/л Dry residue, mg/l	3600	3600	3300	2808	2805.8	2610	2202	3104	3338	2796.9
Na^+, мг/л Na^+, mg/l	450.0	570.0	590.0	572.24	570.26	440.0	534.78*	699.7	726.5	586.41
NH_4^+	<0.01	0.15	<0.01	н. с.	н. с.	<0.01	н. с.	0.7	0.13	н.с.
K^+	15.1	15.4	15.9	7.0	н. с.	13.10	*	14.0	н. с.	н. с.
Ca^{2+}	340.0	310	310	308.0	290.60	240	280.6	316.4	346.7	304.6
Mg^{2+}	95	87.0	86.0	83.68	86.28	68	82.64	94.0	97.22	88.71
Cl^-	1482.0	1356.0	1310.0	1212.7	1191.20	1004	1134.5	1383.6	1489.0	1255.6
SO_4^{2-}	410.0	410.0	400.0	451.0	432.08	310	436.19	562.9	562.1	456.76
HCO_3^-	172.0	215.0	202.0	216.55	195.26	231	н. с.	219.6	195.26	189.15
NO_3^-	0.19	0.01	0.04	н. с.	н. с.	0.10	н. с.	0	н. с.	н. с.
H_2SiO_3	13.47	17.06	17.36	14.0	н. с.	16.76	н. с.	7.8	н. с.	н. с.
TOC	0.38	<0.1	0.39	н. с.	н. с.	0.91	н. с.	н. с.	н. с.	н. с.
$CO_{2\ расч}$	6.69	10.92	16.80	н. с.	н. с.	16.02	н. с.	23.04	н. с.	н. с.

карбонатная щелочность ($rHCO_3^- + 2rCO_3^{2-}$) Carbonate alkalinity	2.82	3.52	3.31	3.55	3.38	3.79	3.4	3.6	3.2	3.1
$2rCa^+$/ ($rHCO_3^- + 2rCO_3^{2-}$)	12.04	8.78	9.35	8.66	8.59	6.33	8.24	8.77	10.81	9.81
rNa/rCl	0.47	0.65	0.70	0.73	0.74	0.68	0.73	0.78	0.75	0.72
(rCl-rNa)/rMg	2.84	1.87	1.59	1.35	1.23	1.63	1.28	1.1	1.29	1.35
rMg**/rCl	0.32	0.28	0.30	0.27	0.28	0.26	0.26	0.21	0.25	0.28
гидрохимический тип вод по В. А. Сулину Hydrochemical type of water according to V. A. Sulin	ClCa (хлоркальциевый при rNa/rC<1 и (rCl-rNa)/rMg >1) ClCa (calcium chloride at rNa/rC<1 and (rCl-rNa)/rMg>1)									

Примечания: ТОС — общий органический углерод; н. с. — нет сведений; r — содержание ионов в мг-экв./л;
* — совместное определение ионов натрия и калия; $rMg^{**} = (rCa+rMg)-(rHCO_3+rSO_4)$

Notes: TOC — Total organic carbon; н. с. — no data; r — ion content in mol/l;
* — joint determination of sodium and potassium ions; $rMg^{**} = (rCa+rMg)-(rHCO_3+rSO_4)$

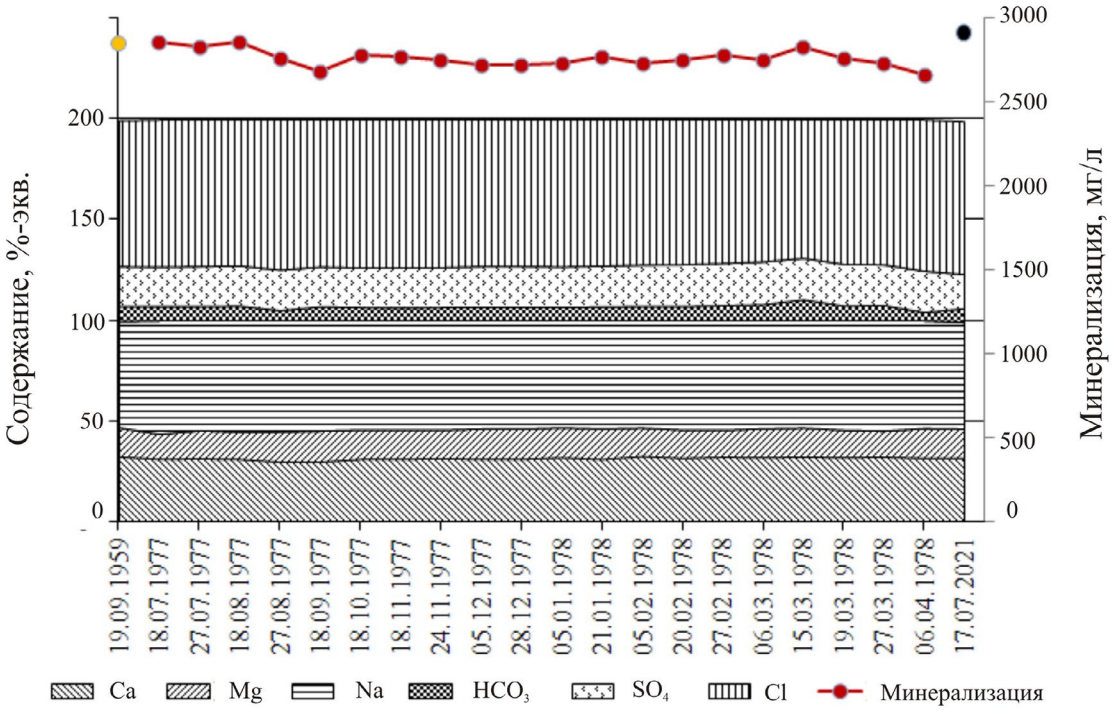

Рис. 2. Изменения химического состава и минерализации вод источника 21-20 за период 1959–2021 гг. Включены данные из неопубликованных работ Б. М. Зимакова (Геохимия…,1961)[1] и И. А. Конжина и др. (Отчет по детальной…,1978)[3]

Fig. 2. Changes in the chemical composition and mineralization of waters of spring 21-20 for the period 1959–2021. Data from unpublished works by B. M. Zimakov (Geochemistry…, 1961)[1] and I. A. Konzhin et al. (Report of the detailed…, 1978)[3] are included

Воды источников всех трех групп, по данным обследования 2021 г., относятся к хлоркальциевому типу при rNa/rCl<1, (rCl-rNa)/rMg>1 (табл. 2). Несмотря на небольшую минерализацию, воды несут отпечаток морского генезиса, о чем свидетельствуют гидрохимические коэффициенты *rNa/rCl* = 0.47–0.70; *rMg*/rCl* = 0.26–0.32; *(rCl-rNa)/rMg* = 1.59–2.84. Соотношения ионов, рассчитанные по анализам для вод нижнекаменноугольных отложений, опробованных скважинами в 1977 г. (табл. 2), показали в целом близкие величины: *rNa/rCl* (0.72–0.78), *rMg*/rCl* (0.21–0.28), *Cl/Br* (288) и *(rCl-rNa)/rMg* (1.1–1.35). Сопоставление этих коэффициентов проведено со значениями для морских вод — 0.87, 0.13, 297 и 6.57 соответственно.

Химический состав трещинно-карстовых исследованых минеральных вод отражает и взаимодействия вод и пород, литолого-геохимические свойства водовмещающих пород. О наличии связи с морским генезисом вод и вмещающих их толщ, являющихся поставщиком Ca, Sr и др. элементов, свидетельствуют повышенные содержания стронция 4.0–5.1 мг/л, а также отношение Ca/Sr (59.7–66.93). Для морской воды величина Ca/Sr составляет около 33, и накопление этих элементов, в большей степени кальция, происходит за счет выщелачивания и растворения известняков. Следовательно, изменение накопления в водах элементов (прежде всего Cl, Na, Ca, Mg) является результатом преобразований — процессов метаморфизации в прямом направлении, происходящих при взаимодействии вод седиментационных морских и смешанных с палеоинфильтрационными со вмещающими карбонатными породами. Влияние последующего разбавления на соотношение компонентов (гидрохимические коэффициенты) по мере подъема на поверхность за счет пресных вод зоны активного водообмена не столь существенно. Разбавление вод выражается больше в уменьшении концентраций химических элементов. На основе данных ионного состава вод графоаналитическим методом по А. Н. Огильви было рассчитано (Отчет по детальной…, 1978)[3], что минеральные воды Янейтывисского ММПВ сформированы в результате смешения восходящих глубинных высокоминерализованных (13.2 г/л) сульфатно-хлоридных вод с пресными (0.4–0.6 г/л) водами зоны активного водообмена в соотношении 3/4 пресных и 1/4 высокоминерализованных.

Данные гидрохимии по источникам стали исходными для оценки пластовых условий формирования солевого состава минеральных вод (температуры, глубины) (табл. 4). Рассчитанные значения по SiO_2-, Na-Li-, K-Mg-геотермометрам, которые возможно применять для относительно низких температур, показали значительные различия. Для определения глубины залегания пластовых вод по полученным расчетным температурам использован геотермический градиент 2.8 °C/100 м. Наиболее достоверными считаем результаты, полученные по SiO_2-геотермометру. Полагаем, что пластово-трещинные воды поступают с глубины более 1.6 км, где температура около 46–54 °C. Этому не противоречат данные по опробованию вод нижнекаменноугольного водоносного комплекса в скважине 4-Падимейская. В интервале глубин 1757–1767 м замеренная пластовая температура была 58 °C, минерализация хлоридных кальциево-натриевых вод — 10.2 г/л. В интервале 2410–2431 м минерализация пластовых вод — 11.9 г/л, температура — 68 °C.

На исследованном участке гряды Чернова в зону активного водообмена вовлечены каменноугольные карбонатные породы; восходящие напорные минеральные воды растворяют и выщелачивают их.

Результатом этого является закарстованость трещиноватых известняков и доломитизированных известняков, особенно в приконтактной зоне разломов, что и было выявлено при разведочном бурении скважин. С другой стороны, величина гидрохимического коэффициента $2rCa^{+}/(rHCO_3^{-} + 2rCO_3^{2-})$ больше единицы (табл. 2). При увеличении концентрации ионов кальция, превышающих карбонатную щелочность (Геохимия..., 2004), невысокие содержания водорастворенной CO_2 в водах источников (6.7–16.8 мг/л) свидетельствуют о вероятности осаждения $CaCO_3$. Этот процесс вторичного минералообразования в трещинах, кавернах и гнездах выщелачивания известняков — залечивание их кальцитом — также зафиксирован по керну скважин.

Впервые полученные данные изотопного состава (δD, $\delta^{18}O$) минеральных вод янейтывисских источников свидетельствуют об их преимущественном питании водами с низкими показателями δD –111.9... –109.2 ‰ (SMOW) и $\delta^{18}O$ –15.78... –15.15 ‰ (SMOW) (рис. 3). Эти значения располагаются практически на глобальной линии метеорных вод ($\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$) (Craig, 1961). В сравнении с изотопным составом пластовых вод каменноугольно-нижнепермского водоносного комплекса Печорской впадины, изученных Ю. Б. Селецким и др. (1990)[4], они являются изотопно легкими. Обращает на себя внимание облегченный изотопный состав минеральных вод источников на р. Янэйтывис и ранее исследованных на р. Пымвашор (Митюшева и др., 2012). Это отражает схожесть условий формирования трещинно-карстовых минеральных вод, приуроченных к карбонатным породам палеозоя.

Поскольку была установлена гидравлическая связь речных и подземных минеральных вод на данном участке, проводилось сопоставление их изотопных характеристик. Величины $\delta^{18}O$ в водах источников и рек отличаются не более 3 ‰, а δD — значительно. Речные воды Янэйтывис более тяжелые по обоим изотопам: $\delta^{18}O$ –12.97 ‰ и δD –94.5 ‰. Для речных вод с преимущественным снеговым питанием можно было предположить близкий изотопный состав речных вод и снега. Но по данным В. С. Брезгунова и др. (1987), среднее значение $\delta^{18}O$ снежных осадков в районе г. Воркуты –18 ‰. К сожалению, нет данных по составу изотопов речных и озерных вод Большеземельской тундры. Были проведены наблюдения за изотопами кислорода и водорода снега и льда многолетних снежников Полярного Урала (Васильчук и др., 2018).

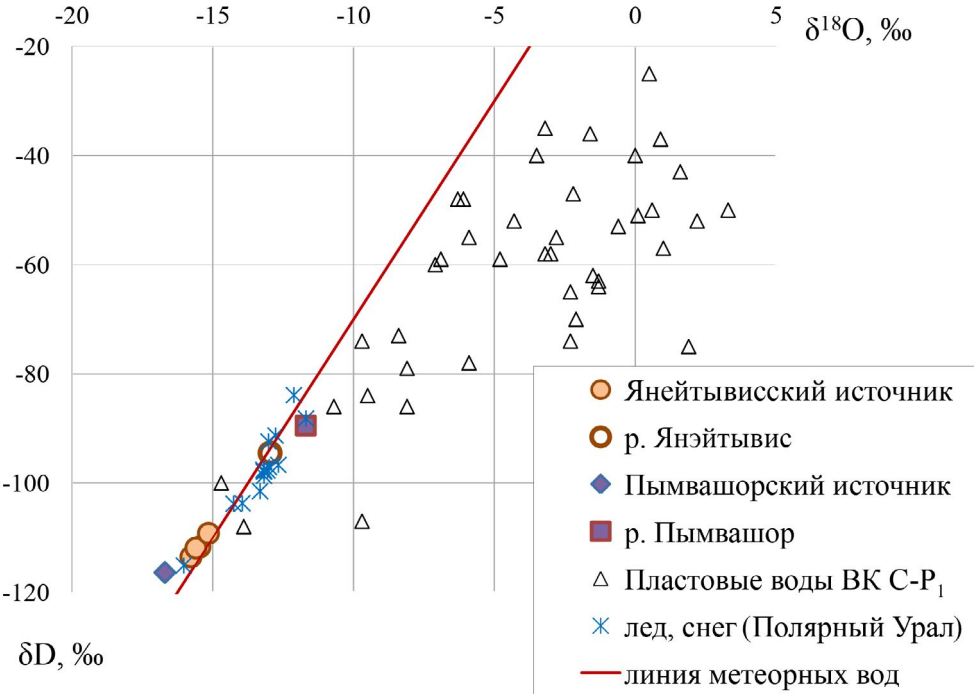

Рис. 3. Изотопный состав (δD, $\delta^{18}O$) вод минеральных источников и рек в районе Янейтывисского месторождения минеральных вод. Данные по пластовым водам каменноугольно-нижнепермского водоносного комплекса Печорской впадины приведены по Ю. Б. Селецкому и др.[4] Изотопный состав снега и льда многолетних снежников Полярного Урала — по Ю. К. Васильчук и др. (2018)

Fig. 3. Isotopic composition (δD, $\delta^{18}O$) of waters of mineral springs and rivers in the area of the Yanejtyvis mineral water deposit. Data on formation waters of the Carboniferous-Lower Permian aquifer complex of the Pechora Depression are according to Yu. B. Seletsky et al.[4]. Isotopic composition of snow and ice of perennial snowfields of the Polar Urals according to Yu. K. Vasilchuk et al. (2018)

[4] Использовать естественный изотопный состав глубоких подземных вод Тимано-Печорской провинции с целью изучения условий их формирования: Отчет / п. Зеленый, ВСЕГИНГЕО, 1990. Отв. исполн. Ю. Б. Селецкий, В. А. Поляков, В. В. Ачакасов. ГБУ РК «ТФИ РК», Сыктывкар. Инв. № 10922.

Use of natural isotopic composition of deep groundwater of the Timan-Pechora province in order to study the conditions of their formation. Report Territorial Geological Funds of the Komi Republic. Syktyvkar. P. Zeleny, VSEGINGEO, 1990. Exec. Yu. B. Seletskiy, V. A. Polyakov, V. V. Achakasov, No. 10922 (in Russian)

Таблица 3. Результаты определения содержания растворенных форм элементов в водных пробах методами ICP-OS и ICP-MS

Table 3. Results of determination of the content of dissolved forms of elements in water samples by ICP-OS and ICP-MS methods

Элемент Element	ПДК (СанПиН 1.2.3685-21, 2021) Maximum permissible concentration (SanPiN 1.2.3685-21, 2021)	Поверхностные воды / Surface waters					Показатели химической безопасности минеральных вод (ГОСТ..., 2020; Об утверждении..., 2022) Indicators of chemical safety of mineral waters (GOST.., 2020; On approval..., 2022	Подземные воды / Underground water						
		р. Воргашор Vorgashor river	р. Янэйтывис Yaneytyvis river		Озеро старичное Oxbow lake	Водоток из старичных озер Water flow from oxbow lakes		пресные fresh	минеральные источники / mineral springs					
									1-я группа 1st group			2-я группа 2nd group		3-я группа 3rd group
	21-13	21-17	21-29		21-23	21-25		21-18	21-14	21-15	21-16	21-19	21-20	21-27
Na, мг/л	200	34	2	12.4	**233**	**407**	–	8.6	175	152	506	492	491	401
Ca	–	25	16	23	100	187	–	38	111	98	259	234	230	190
Mg	50	8.3	3.4	5.2	33	**60**	–	9.3	36	30	84	74	69	57
Sr	7	0.26	0.07	0.16	2.06	4.03	25	0.20	1.65	1.28	5.08	5.01	4.84	4.02
K	–	1.01	0.37	0.51	3.7	7.7	–	0.81	3.2	2.8	8.4	9.7	9.7	8.3
Mn	0.1	0.0001	0.078	0.098	0.049	**0.92**	0.4	нпо	0.018	0.01	0.8	0.77	0.71	0.75
Si	25	2.1	1.41	1.59	0.23	3.48	–	3.84	3.76	3.37	4.48	5.37	5.2	5.28
Fe	0.3	0.05	**0.55**	**0.59**	0.14	0.024	–	нпо	следы traces	0.23	0.90	0.29	0.36	0.71
Li,	0.03	0.056	0.016	0.0032	**0.054**	**0.013**	–	0.0044	0.085	0.063	0.12	0.19	0.16	0.12
B	0.5	0.041	0.010	0.021	0.25	**0.60**	–	0.019	0.34	0.25	0.52	0.85	0.74	0.57
Al, мкг/л	200	1.8	1.6	1.9	44.2	нпо	–	2.6	нпо	5.31	13.49	нпо	0	19.75
P	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	–	9.4	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Sc	–	0.67	0.37	0.51	нпо	нпо	–	1.3	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Ti	100	0.35	0.25	0.30	нпо	нпо	–	0.70	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
V	100	0.32	0.22	0.25	11	14	–	0.66	27	23	12	19	12	13
Cr	50	0.87	0.60	0.69	27	30	–	2.1	56	56	26	37	29	31
Co	100	0.26	0.12	0.17	1.4	2.8	–	0.23	2.5	2.0	3.4	4.5	3.7	2.6
Ni	20	1.2	0.93	0.99	4.6	8.6	20	0.55	6.4	4.2	7.0	11.0	7.9	6.9
Cu	100	0.51	0.42	0.36	3.0	4.8	1000	0.10	3.7	3.1	5.0	7.3	5.9	4.8
Zn	5000	0.24	0.41	нпо	нпо	нпо	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
As	10	0.45	0.42	0.56	нпо	нпо	50	0.35	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо

Se	10	нпо	нпо	0.52	нпо	нпо	50	0.36	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Rb	–	0.56	0.42	0.49	2.8	7.0	–	0.33	4.5	3.3	5.0	11.0	9.1	6.5
Y	–	нпо	нпо	нпо	0.31	0.22	–	нпо	0.14	0.20	0.45	0.21	0.22	0.13
Zr	–	нпо	нпо	нпо	0.28	нпо	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Mo	70	0.20	0.14	0.16	0.19	0.88	–	0.66	1.8	1.5	0.57	1.4	0.72	0.79
Rh	–	нпо	нпо	нпо	нпо	0.62	–	нпо	нпо	нпо	0.61	0.93	0.77	0.60
Pd	–	0.77	0.17	0.45	9.0	25.0	–	0.50	18.0	13.0	25.0	37.0	30.0	23.0
Cs	–	нпо	нпо	нпо	0.28	0.39	–	нпо	0.48	0.72	0.25	0.50	0.33	0.42
Ba	700	9.0	1.8	3.6	47	72	5000	2.0	57	63	82	100	76	62
La	–	нпо	нпо	нпо	0.93	0.32	–	нпо	0.62	0.24	1.1	нпо	нпо	0.24
Ce	–	нпо	нпо	нпо	0.54	0.21	–	нпо	0.18	0.31	0.39	нпо	нпо	0.17
Pr	–	нпо	нпо	нпо	0.28	0.10	–	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо	нпо	0.10
Eu	–	нпо	нпо	нпо	0.37	нпо	–	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо	нпо	нпо
Er	–	нпо	нпо	нпо	0.42	нпо	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Tm	–	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо	–	нпо	нпо	нпо	0.19	нпо	нпо	0.09
Lu	–	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо	–	нпо	нпо	нпо	0.21	нпо	нпо	0.16
Pb	10	нпо	нпо	нпо	0.54	1.4	10	нпо	0.49	0.49	0.22	2.8	02.2	1.1
Th	–	нпо	нпо	нпо	0.61	0.14	–	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
U	–	0.18	нпо	0.10	0.09	0.42	–	0.62	1.40	1.07	0.86	0.21	0.36	0.39

Примечания: нпо — ниже предела обнаружения.
Жирным шрифтом выделены превышения элементов относительно предельно допустимых концентраций (ПДК) СанПиН 1.2.3685-21.

Notes: нпо — below the detection limit.
Elements exceeding the MPC of SanPiN 1.2.3685-21 are highlighted in bold.

Измеренные величины δD и $\delta^{18}O$ вод р. Янэйтывис входят в диапазон значений, полученных для льда и снега.

Для подтверждения или исключения роли вод оттаявших многолетнемерзлых пород в формировании вод минеральных источников, приведем имеющиеся данные для пласта льда, залегающего на глубине 28–32 м Бованенковской площади (Ямал) (Васильчук, 2020) со следующим изотопным профилем: $\delta^{18}O$ от –16.95 до –18.29 ‰, а δD от –131.7 до –146 ‰. Эти величины (на графике не приведены) находятся в области наиболее низких значений и, вероятно, незначительно отличаются от показателей для ММП исследованного нами региона. Полагаем, что полученный для минеральных вод источников на р. Янэйтывис легкий состав тяжелых стабильных изотопов водорода и кислорода-18 отражает смешанный генезис вод. Наибольший вклад в формирование изотопного состава вод вносят, с одной стороны, поступления изотопно-облегченных компонентов вод современных осадков, сформированных в холодных климатических условиях, и вод от деградирующей в зонах таликов многолетнемерзлой толщи и, с другой стороны, в меньшей степени, морские (или смешанные) пластово-трещинные воды нижнекаменноугольных отложений.

Б. М. Зимаковым в 1959 г. при изучении геохимии газов осадочной толщи полярной части Урала было установлено, что Усть-Воргашорский (Янейтывисский) источник периодически газирует. Состав свободного

Таблица 4. Температурные характеристики вод источников

Table 4. Temperature characteristics of spring waters

№ пробы Sample No.	Измеренная температура, °С Measured temperature, °С	Расчетные значения пластовой температуры по гидрохимическим геотермометрам, °С Calculated formation temperature values according to hydrochemical geothermometers, °С			Расчетная глубина по геотермометрам, °м Calculated depth according to geothermometers, °m		
		Na-Li	*SiO_2*	*K–Mg*	*Na-Li*	*SiO_2*	*K–Mg*
21-16	3.5	18	46	34	645	1644	1197
21-19	5.6	27	53	32	947	1899	1155
21-20	5.2	19	54	32	667	1918	1131
21-27	3.4	19	53	33	674	1880	1181

Таблица 5. Физико-химическая характеристика исследованных поверхностных вод

Table 5. Physicochemical characteristics of the studied surface waters

Параметры Parameters	Источники поверхностных вод / Surface water sources			
	р. Воргашор Vorgashor river	р. Янэйтывис Yaneytyvis river		Водоток из старичных озер в р. Янэйтывис Water flow from oxbow lakes to the Yaneytyvis River
	Точки наблюдения / Observation points			
	21-13	21-17	21-29	21-25
pH	8.0	7.4	7.6	7.7
температура, °С temperature, °С	15.5	16.2	15.7	13.0
минерализация, мг/л mineralization, mg/l	426	124	187	2043
Na^+	34	3.8	14.9	430
NH_4^+	< 0.01	< 0.01	<0.01	<0.01
K^+	1.01	0.37	0.66	11.10
Ca^{2+}	49	20	28	230
Mg^{2+}	106	3.6	5.8	68
Cl^-	82	5.1	27	1046
SO_4^{2-}	20.4	2.7	7.9	235
HCO_3^-	134	88	103	23
NO_3^-	<0.01	<0.01	<0.01	0.03
H_2SiO_3	6.29	3.98	0.69	11.07
$CO_{2\ расч}$	5.98	15.27	10.70	н. с.
Fe	0.49	0.55	0.59	0.024
жесткость общая, мг-экв/л total hardness, mol/l	11.17	1.29	1.87	17.07
состав вод water composition	Cl-HCO_3 Mg	HCO_3 Ca-Mg	HCO_3-Cl Ca-Na	Cl Na-Ca

газа азотный (N_2 — 94 %, O_2 — 5 %, CO_2 — 1 %) с гелиеносностью (He + Ne = 0.12428 %, Ar + Kr = 1.305%) и низким содержанием углеводородов (0.01 %). Основным отличием при сопоставлении с составом спонтанных газов сероводородных источников гряды Чернышева (Митюшева и др., 2012) является присутствие кислорода и меньшее количество гелия. Водорастворенные газы Усть-Воргашорского источника также имели азотный состав (%): N_2 — 93.6, O_2– 1.2, CO_2 — 4.01, H_2 — 1.2, CH_4 — 0.1, нафтеновые кислоты — 1.0 мг/л. Газовый состав минеральных вод, вскрытых скважинами, изученный при разведке Янейтывисского месторождения (Отчет по детальной…, 1978)[3] также азотный (%): N_2 — 80–94, CO_2 — 2–3, O_2 — 5–6, H_2 — 0–0.2, CH_4 — до 4.4, Ar — 0.91–1.4.

Речная долина Янэйтывис является зоной концентрированного подземного стока и разгрузки минеральных и пресных карстовых вод. Здесь на небольшом участке выходов исследованных источников и наличия сквозного талика под реками образовалась особая экосистема, отличающаяся от окружающей тундры. Наблюдаем преобразования в качественном составе поверхностных вод, связанные с особыми условиями питания. И поскольку подземные воды взаимосвязаны с поверхностными, в статье приводится их гидрохимическая характеристика (табл. 3, 5). Минерализация и химический состав вод р. Янэйтывис на этом небольшом участке изменяется от 0.12 до 0.19 г/л. Характерный для вод арктической зоны гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав (21-17) здесь становится HCO_3-Cl Ca-Na (21-29). Концентрации элементов Mg, Sr, Li, Ba, B, Pd возросли за счет поступления подземных минеральных вод (стоков от источников и субаквальной разгрузки в русле) в 2–3 раза, а Na — шестикратно. Нетипичным является и гидрокарбонатно-хлоридный магниевый (Mg — 69, Ca — 19 %-экв.) состав вод р. Воргашор (21-13) с минерализацией 0.43 г/л. Сопоставление состава микроэлементов (табл. 3) показало в речных водах наличие ряда веществ 1–3 класса опасности (As, Se, Zn), а также Sc и Ti, отсутствующих в минеральных водах источников. Полагаем, что их наличие обусловлено техногенным аэрозольным загрязнением, поступающим от разработок Воркутинских угольных шахт, ТЭС и других промышленных предприятий. Было установлено (Оберман и др., 2004), что горелые и углистые породы отвалов, угольный шлам в Воркутинском районе содержит свыше ПДК As, Zn, Cu, Ni и на уровне и более ПДК Li, Sb, Cr, Mn и Co. По данным М. И. Василевич и др. (2018), в районе Воркутинской агломерации содержание в снеге взвешенных частиц достигает 35 мг/дм^3 (в четыре раза превышает фоновое значение), больше фона выявлены полютанты: Cu и Mn (в 3–10 раз), Ni, Pb, Cr, Co, Al (до 20 раз), Hg в 100 и более раз, Cd и V (в 1.5 и 2–8 раз, соответственно). При этом важно подчеркнуть, что речные воды в районе Янейтывисского ММПВ не удовлетворяют СанПиН 1.2.3685-21 только по содержанию железа. Повышенные концентрации железа в целом характерны для региона и обусловлены прежде всего природным фактором.

Особый состав имеют озеро и водоток (т. н. 21-25, 21-23) из группы озер правого борта р. Янэйтывис. Воды слабосоленые, с минерализацией до 2.0 г/л, хлоридные кальциево-натриевого состава (хлоркальциевого типа), очень жесткие. Старичные озера накапливают пресный поверхностный сток с водосборной площади, сложенной четвертичными отложениями, и стоки минеральных вод от многочисленных источников. Эти поверхностные воды обогащены практически тем же набором микроэлементов (табл. 3), что и минеральные воды. Важно подчеркнуть, что имеется ряд компонентов (Th, Zr, Er), не выявленных в пресных и минеральных подземных водах исследованного участка. Возможно, в озерах существуют благоприятные условия для аккумуляции элементов, поступающих из окружающей природной среды (почв, пород) или за счет антропогенного загрязнения пылеаэрозольными частицами. Как поверхностные водные объекты культурно-бытового водопользования озеро и водоток должны соответствовать СанПиН 1.2.3685-21, однако выявлены превышения относительно ПДК содержаний марганца (4.9–9.2), лития (1.8–4.3), натрия (1.2–2.0), магния и бора (до 1.2).

Заключение

Исследованы воды минеральных источников на Янейтывисском месторождении подземных минеральных вод, разведанном в 70-е годы XX в., которое находится за Северным полярным кругом в Арктической зоне России. Опробованы три группы очень холодных/холодных подземных источников с минерализацией 2.3–3.0 г/л в долине р. Янэйтывис, приуроченных к зоне Янейтывисского разлома гряды Чернова, и поверхностные воды данного района.

Напорные минеральные подземные воды субкриогенного нижнекаменноугольного водоносного комплекса, выведенные на поверхность, слабощелочные, маломинерализованные, хлоридные кальциево-натриевого состава, относятся к хлоркальциевому типу по В. А. Сулину. Проведенная оценка изменения химического состава вод во временном разрезе за более чем полувековой период (1959–2021 гг.) показала трансформацию: сульфатно-хлоридный анионный состав вод стал хлоридным при сохранении соотношения основных катионов (Na-Ca) и без изменения гидрохимического ClCa-типа.

Получены новые данные по микрокомпонентному составу вод. Впервые определен изотопный состав (δD, $\delta^{18}O$) минеральных вод Янейтывисского источника и речных вод. Все эти гидрохимические данные свидетельствует о смешанном генезисе вод. Химический состав минеральных вод источников несет в себе черты восходящих глубинных высокоминерализованных седиментогенных пластово-трещинных вод каменноугольного (или более древнего) водоносного комплекса, разбавленных по мере подъема на поверхность по проницаемым зонам разрывных нарушений пресными водами зоны активного водообмена различного генезиса. Генезис этих пресных вод также неоднороден. Они представляют смесь инфильтрационных вод современных областей метеорного питания и оттаявших вод зон таликов многолетнемерзлых пород. Процессы взаимодействия в системе «вода – порода – газ», происходящие в водоносном комплексе, также оказали влияние на формирование химического состава вод и постседиментационные изменения водовмещающих карбонатных толщ.

Оценка пластовых условий формирования солевого состава минеральных вод источников по SiO_2-геотермометру показала, что воды поступают с глубины более 1.6 км, где величина глубинной температуры составляет около 50 °С.

Благодаря выходам Янейтывисских источников на поверхность и наличию сквозного талика на данном участке тундры существует особая экогеосистема, в которой наблюдается преобразование в качественном составе поверхностных вод (речных и озерных). Установлен разнообразный состав этих вод: HCO_3 Ca-Mg, HCO_3-Cl Ca-Na, Cl Na-Ca и Cl- HCO_3 Mg. Некоторые поверхностные водные объекты не соответствуют требованиям СанПиН 1.2.3685-21. Выявлено загрязнение рядом микроэлементов как природного (за счет питания их минеральными водами), так и техногенного происхождения. Янейтывисские водопроявления находятся в 30 км от горнопромышленного центра Большеземельской тундры — г. Воркуты, в зоне поступления в природную среду пылеаэрозольных частиц.

Маломинерализованные сульфатно-хлоридные (хлоридные) кальциево-натриевые воды Янейтывисского ММПВ по новому ГОСТ Р 54316–2020 по назначению являются лечебно-столовыми и относятся к XXI группе. Наиболее близки к хиловскому гидрохимическому типу минеральных вод с минерализацией 2.0–5.0 г/л. В настоящее время Янейтывисское ММПВ с запасами 1020 м^3/сут категории «C_2» находится в нераспределенном фонде недр. Для организации розлива лечебно-столовой минеральной воды «Янейтывисская». необходимо провести геологические исследования (доразведку) месторождения, включая работы, требующие немалых затрат: расконсервацию скважин, анализ вод на соответствие требованиям ГОСТ Р 54316–2020, получить новое бальнеологическое заключение о химическом составе минеральных вод.

Работа проводилась в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040600011-5).

Выражаем искреннюю благодарность Г. А. Игнатьеву, О. В. Кокшаровой, Н. В. Туленковой (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), сотрудникам экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, В. Ю. Лаврушину (ГИН РАН) за помощь в организации и выполнении аналитических исследований. Признательны сотрудникам геологического отряда № 11 Е. В. Антроповой, А. Н. Калмыкову, Ю. А. Кокшаровой, А. М. Митюшеву, О. А. Молодцовой, И. Н. Размыслову за помощь в проведении экспедиционных работ и отборе проб.

Литература / References

Брезгунов В. С., Есиков А. Д., Якимова Т. В. и др. Распределение среднегодовых концентраций кислорода-18 в осадках на европейской территории СССР // Материалы метеорол. исследований. 1987. № 12. С. 54—58.
Brezgunov V. S., Yesikov A. D., Yakimova T. V. et al. Distribution of average annual oxygen-18 concentrations in precipitation in the European territory of the USSR. Proc. meteorological studies, 1987, No. 12, pp. 54–58. (in Russian)

Василевич М. И., Василевич Р. С., Шамрикова Е. В. Поступление загрязняющих веществ с зимними атмосферными осадками на территорию Воркутинской агломерации // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. Вып. № 3. С. 244–254. https://doi.org/10.7868/S0321059618030033
Vasilevich M. I., Vasilevich R. S., Shamrikova E. V. Receipt of pollutants with winter precipitation into the territory of the Vorkuta agglomeration. Water Resources, 2018, V. 45, No. 3, pp. 244–254. (in Russian)

Васильчук Ю. К. Некоторые очевидные свидетельства внутригрунтового генезиса пластовых льдов на севере Евразии // Арктика и Антарктика. 2020. № 1. С. 23–34. DOI: 10.7256/2453-8922.2020.1.32283
Vasilchuk Yu. K. Some obvious evidence of intra-ground genesis of massive ice in the north of Eurasia. Arctic and Antarctic, 2020, No. 1, pp. 23–34. (in Russian) DOI: 10.7256/2453-8922.2020.1.32283

Васильчук Ю. К., Чижова Ю. Н., Буданцева Н. А., Васильчук А. К., Облогов Г. Е. Изотопный состав снежников и ледников полярного Урала // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 1. С. 81–89.
Vasilchuk Yu. K., Chizhova Yu. N., Budantseva N. A., Vasilchuk A. K., Oblogov G. E. Isotopic composition of snowfields and glaciers of the polar Urals. Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography, 2018, No. 1, pp. 81–89. (in Russian)

Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С. Р. Крайнов, Б. Н. Рыженко, В. М. Швец. М.: Наука, 2004. 677 с.
Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects. S. R. Krainov, B. N. Ryzhenko, V. M. Shvets. Moscow: Nauka, 2004, 677 p. (in Russian)

Гидрогеология СССР. Том XLII. Коми АССР и Ненецкий национальный округ Архангельской области РСФСР. М.: Недра, 1970. 288 с.
Hydrogeology of the USSR. V. XLII. Komi ASSR and Nenets National District of the Arkhangelsk Region of the RSFSR. Moscow: Nedra, 1970, 288 p. (in Russian)

ГОСТ Р 54316—2020. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. Национальный стандарт РФ (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13.03.2020 г. № 133-ст). М.: Стандартинформ, 2020.
GOST R 54316—2020. Natural drinking mineral waters. General specifications. National standard of the Russian Federation (approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated March 13, 2020. № 133-st). Moscow: Standartinform, 2020. (in Russian)

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q–41 — Воркута. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Ural Series. Sheet Q-41 — Vorkuta. Explanatory Note. Saint Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2007, 541 p. + 4 incl. (in Russian)

Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской федерации. На 1 января 2023 года. Выпуск 101. Подземные воды. Том II. Минеральные воды. М.: МПР РФ, 2023.
State Balance of Mineral Reserves of the Russian Federation. As of January 1, 2023. Issue 101. Groundwater. V. II. Mineral Waters. Moscow: MPR RF, 2023. (in Russian)

Завгорудько В. Н., Сидоренко С. В., Кортелев В.В., Завгорудько Т. И., Завгорудько Г. В. Колымская здравница «Талая»: К 80-летию // Вопросы курортологии, физи-

отерапии и лечебной физической культуры, 2020. Т. 97(3). С. 94–98.

Zavgorudko V. N., Sidorenko S. V., Kortelev V. V., Zavgorudko T. I., Zavgorudko G. V. Kolyma health resort «Talaya»: Celebratin the 80th anniversary. Issues of balneology, physiotherapy and therapeutic physical culture, 2020, V. 97(3), pp. 94–98. (in Russian)

Лечебно-минеральные воды Тимано-Печорского территориально-производственного комплекса / Л. В. Мигунов, Ю. И. Зытнер, В. А. Дедеев, В. П. Якуцени. Сыктывкар, 1983. 40 с. (Научные рекомендации - народному хозяйству / Коми филиал АН СССР; Вып. 42).

Therapeutic mineral waters of the Timan-Pechora territorial production complex / L. V. Migunov, Yu. I. Zytner, V. A. Dedeev, V. P. Yakutseni. Syktyvkar, 1983, 40 p. (Scientific recommendations for the national economy. Komi Branch USSR AS, 42.) (in Russian)

Митюшева Т. П. Ресурсы и перспективы использования лечебных минеральных вод арктической части Европейского Северо-Востока // Минерально-сырьевые ресурсы арктических территорий Республики Коми и Ненецкого автономного округа: Материалы научно-практ. совещ. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. С. 49–51.

Mityusheva T. P. Resources and Prospects for the Use of Medicinal Mineral Waters in the Arctic Part of the European North-East. Mineral Resources of the Arctic Territories of the Komi Republic and the Nenets Autonomous Okrug. Proc. of the Scientific and Practical Conference. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2016, pp. 49–51. (in Russian)

Митюшева Т. П., Лаврушин В. Ю., Поляк Б. Г. Изотопный состав вод минеральных источников северного Предуралья // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы всерос. конф. с участием иностр. ученых. Томск: Изд-во НТЛ, 2012. С. 332–336.

Mityusheva T. P., Lavrushin V. Yu., Polyak B. G. Isotopic Composition of Mineral Spring Waters in the Northern Cis-Urals. Geological Evolution of Water Interaction with Rocks: Proc. of the All-Russian Conf. with the Participation of Foreign Scientists. Tomsk, NTL Publishing House, 2012, pp. 332–336. (in Russian)

Оберман Н. Г., Шеслер И. Г., Рубцов А. И. Экогеология Республики Коми и восточной части Ненецкого автономного округа. Сыктывкар: ПрологПлюс, 2004. 256 с.

Oberman N. G., Shesler I. G., Rubtsov A. I. Ecogeology of the Komi Republic and the eastern part of the Nenets Autonomous Okrug. Syktyvkar: PrologPlus, 2004, 256 p. (in Russian)

Подземные воды Европейского Северо-Востока СССР / В. А. Дедеев, Ю. И. Зытнер, Н. Г. Оберман и др. Сыктывкар, 1989.157 с.

Groundwater of the European North-East of the USSR. V. A. Dedeev, Yu. I. Zytner, N. G. Oberman et al., Syktyvkar, 1989, 157 p. (in Russian)

Об утверждении классификации природных лечебных ресурсов, медицинских показаний и противопоказаний к их применению в лечебно-профилактических целях: Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 31.05.2021 № 557н. Зарегистрирован 29.09.2021 № 65177. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/ 0001202109290027 (дата обращения: 20.06.2022 г.).

On approval of the classification of natural medicinal resources, medical indications and contraindications for their use for therapeutic and prophylactic purposes: Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 31.05.2021 № 557n. Registered on 29.09.2021, № 65177.

Среднегодовые температуры и количество осадков. Воркута // Архив фактической погоды. Гидрометцентр России. URL:http://meteoinfo.ru/archive-pogoda (дата обращения: 26.09.2024 г.)

Average annual temperatures and precipitation. Vorkuta Archive of actual weather. Hydrometeorological Center of Russia. http://meteoinfo.ru

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2. URL:http://ivo.garant.ru/#/document/400274954/paragraph/37879:0. (дата обращения: 19.01.2023 г.).

SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of January 28, 2021, № 2.

Тектоника Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции: (Объяснительная записка к «Структурно-тектонической карте Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции» масштаба 1:1000000) / В. А. Дедеев, В. В. Юдин, В. И. Богацкий, А. Н. Шарданов. Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар, 1989. 28с.

Tectonics of the Timan-Pechora oil and gas province. (Explanatory note to the «Structural and tectonic map of the Timan-Pechora oil and gas province» at a scale of 1:1,000,000). V. A. Dedeev, V. V. Yudin, V. I. Bogatsky, A. N. Shardanov. Komi SC UB RAS, Syktyvkar, 1989, 28 p. (in Russian)

Термы Чукотки / Б. Г. Поляк, В. Ю. Лаврушин, А. Л. Чешко, О. Е. Киквадзе М.: ГЕОС, 2022. 222 с. (Труды Геологического института, Вып. 631).

Thermal Waters of Chukotka. B. G. Polyak, V. Yu. Lavrushin, A. L. Cheshko, O. Ye. Kikvadze. Moscow: GEOS, 2022, 222 p. (Proceedings of the Geological Institute, V. 631). (in Russian)

Craig H. Isotope variation in meteoric waters // Science, 1961. V. 133. P. 1702–1703.

Fouillac C., Michard, G. Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs // Geothermics. 1981. V. 10. P. 55–70.

Fournier R. O. Chemical geothermometrs and mixing models for geothermal systems // Geothermics. 1977. V. 5. P. 41–50.

Giggenbach W. F. Geothermal solute equilibria // Geochimica. Cosmochim. Acta 1988. V. 52. P. 2749–2765.

Поступила в редакцию / Received 24.09.2024

УДК 553.3 DOI: 10.19110/geov.2024.10.3

Технологическая минералогия руд стратегических металлов: достижения, проблемы, перспективы

Е. Г. Ожогина[1], О. Б. Котова[2]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, Москва, Россия
vims-ozhogina@mail.ru

[2] Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
kotova@geo.komisc.ru

Минералого-аналитические методы и методология прогнозной оценки твердых полезных ископаемых, по существу, определяют целесообразность и тактику освоения сырьевых объектов, при необходимости — возможность замены в первую очередь стратегического сырья другим. На примере стратегических видов полезных ископаемых: марганцевых руд Усинского и бокситов Верхне-Щугорского месторождений — рассмотрены возможности минералогического изучения сложных по составу и строению руд в рамках оценки их качества. Определены проблемы и перспективы технологической минералогии в решении задач минеральных ресурсов стратегических металлов.

Ключевые слова: *технологическая минералогия, марганцевые руды, Усинское месторождение, алюминийсодержащие руды, Верхне-Щугорское месторождение, стратегические металлы*

Technological mineralogy of strategic metal ores: achievements, problems, prospects

E. G. Ozhogina[1], O. B. Kotova[2]

[1] Fedorovsky All-Russian scientific-research institute of mineral resources, Moscow, Russia
[2] Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

Mineralogical-analytical methods and methodologies for predictive assessment of solid minerals essentially determine the feasibility and tactics of developing raw materials, and, if necessary, the possibility of replacing, first of all, strategic raw materials with others. Using the example of strategic types of minerals: manganese ores of the Usinsk and bauxite deposits of the Upper Shchugor deposit, the possibilities of mineralogical study of ores with complex composition and structure as part of assessing their quality are considered. The problems and prospects of technological mineralogy in solving problems of mineral resources of strategic metals are identified.

Keywords: *technological mineralogy, manganese ores, Usinsk deposit, aluminum-containing ores, Upper Shchugor deposit, strategic metals*

Введение

Обеспеченность ресурсами и технологиями их освоения — основные условия развития минерально-сырьевой базы и безопасности России. В первую очередь востребованы полезные ископаемые, составляющие основу материального обеспечения высокотехнологичных отраслей промышленности. Как правило, такие полезные ископаемые относятся к категории стратегических, т. е. обладают уникальными свойствами, которые не могут заменить другие материалы без серьезных ухудшений свойств конечных продуктов. К стратегическим металлам в России относятся уран, марганец, хром, вольфрам, молибден, титан, литий, тантал и другие (О состоянии…, 2022).

Отечественная минерально-сырьевая база черных, легирующих, редких металлов, бокситов, графита, плавикового шпата, которые также относятся к стратегическому сырью, характеризуется резким сокращением запасов богатых руд и вынужденным вовлечением в переработку комплексных полезных ископаемых, которые нередко относятся к нетрадиционному сырью. Следовательно, необходимы эффективные методы добычи и переработки сырья. Поэтому одним из приоритетных направлений прикладных исследований в области переработки минерального сырья по-прежнему следует считать совершенствование физических и физико-химических методов и методологии прогнозной оценки полезных ископаемых (Инновационные…, 2020). В связи с этим возросла роль технологической минералогии, методы которой позволяют проводить оценку полезных ископаемых на всех стадиях геолого-разведочных работ, прогнозировать поведение руд и горных пород в технологических процессах и качество ожидаемых продуктов (Вайсберг, Козлов, 2014; Ожогина, Котова, 2024).

Возможности технологической минералогии в последние годы значительно расширились благодаря внедрению в прикладные исследования высокоразрешающих многофункциональных приборов, технологий испытаний, заимствованных из смежных областей, и

Для цитирования: Ожогина Е. Г. , Котова О. Б. Достижения, проблемы, перспективы технологической минералогии руд стратегических металлов на примерах марганцевых и алюминиевых руд // Вестник геонаук. 2024. 10(358). С. 28—34. DOI: 10.19110/geov.2024.10.3

For citation: Ozhogina E. G. , Kotova O. B. Technological mineralogy of strategic metal ores: achievements, problems, prospects using manganese and aluminum ores as examples. Vestnik of Geosciences, 2024, 10(358), pp. 28—34, doi: 10.19110/geov.2024.10.3

их разумному сочетанию с традиционными методами минералогического анализа, эффективных способов разупрочнения минералов в руде (например, энергетические воздействия различной природы). Необходимо отметить и успехи минералогов, физиков, технологов, химиков, работающих совместно в области изучения природных и техногенных тонкодисперсных систем, реальные особенности которых уникальны и вносят существенный вклад в процессы обогащения руд (Christy et al., Иванова и др., 2015; Нохрина и др., 2021).

Природные особенности сырья, в большинстве своем комплексного, отличающегося сложным сочетанием текстурно-структурных характеристик, обусловленных генезисом и вторичными изменениями, требуют привлечения расширенного комплекса методов анализа для получения достоверной минералогической информации. Следовательно, необходимо разрабатывать новые и совершенствовать существующие приемы, операции и методы анализа (Kotova et al., 2022).

Одним из способов преодоления дефицита стратегических металлов, вызванного низким качеством балансовых руд, является внедрение новых природоподобных технологий, включая рациональные технологические схемы обогащения и технологического передела (Наумов и др., 2022). Основу таких технологий составляют механизмы природных процессов, к управлению которыми привлечены интеграционные процессы прорывных научных направлений: нано-, био-, цифровых и др. Например, изучение явлений в системе «минерал — среда» позволило разработать новые технологии прогнозной оценки качества минерального сырья и горнопромышленных отходов, заключающиеся в интеграции минералогических методов анализа с развитием экспериментальных работ в области структурных, фазовых и химических трансформаций минералов при различных воздействиях на них в процессах подготовки и обогащения (Ozhogina, Kotova, 2019).

Основная цель работы — совершенствование методов технологической минералогии и методологии прогнозной оценки твердых полезных ископаемых (на примере марганцевых руд Усинского и алюминиевых руд Верхне-Щугорского месторождений).

Объекты исследования

Практический интерес уже на протяжении многих десятилетий представляют марганцевые руды Усинского месторождения, самого крупного в стране месторождения карбонатных марганцевых руд. Известны многочисленные работы, касающиеся различных аспектов изучения этих руд. Однако промышленное освоение Усинского месторождения до сих пор не осуществляется.

Карбонатные марганцевые руды, выявленные на западном крыле Усинской синклинальной структуры, приурочены к нижнекембрийским отложениям, сформированным доломитами, известняками, глинистыми и углистыми сланцами, которые осложнены разрывными нарушениями и прорваны дайками диабазов. Руды представляют собой переслаивание родохрозитовых, манганокальцитовых руд, известняков и сланцев, что определяет их морфоструктурные особенности.

Республика Коми, обладая значительными запасами бокситов, сегодня рассматривается в качестве перспективного района развития ресурсной базы алюминия. Важное значение для региона имеет введение в эксплуатацию открытым способом Верхне-Щугорского месторождения. Известно, что бокситы Северной залежи образовались по полевошпато-карбонатным метасоматитам и относятся к редкометалльно-глиноземистой субформации, бокситы Южной залежи сформировались по сланцево-карбонатным породам и метамергелям. Рудные тела состоят, как правило, из одного пласта и приурочены к средней части разреза бокситоносной толщи. Следует подчеркнуть, что бокситы этого месторождения рассматриваются в качестве бокситов металлургического сорта, а также представляют практический интерес как комплексные.

Методы исследования

Для достоверной прогнозной минералого-технологической оценки полезных ископаемых необходима максимально полная информация не только о руде в целом, но и о слагающих ее минералах, в первую очередь представляющих промышленный интерес и подлежащих извлечению. Это определяет необходимость всестороннего изучения руды и (или) горной породы комплексом методов химического и минералогического анализов. В практике изучения вещественного состава твердых полезных ископаемых сегодня используются различные физические и физико-химические методы, сочетание которых, последовательность применения и объем анализов определяется конкретными задачами.

В наших исследованиях были задействованы традиционные методы оптической микроскопии: оптико-минералогический, оптико-петрографический, минераграфический анализы (световые микроскопы Olympus BS51, Olympus BS 53 (Япония), стереомикроскоп высшего класса Leica MZ12,5 (Германия)). Качественный и количественный минералогические анализы осуществлялись рентгенографическим методом (рентгеновские дифрактометры Shimadzu XRD-6000 (Япония) и X PertPRO (Нидерланды)). Для проведения электронно-микроскопических исследований, включая рентгеноспектральный микроанализ, использовались сканирующие электронные микроскопы ZEM 15 (Китай), TescanVEGA-3 (Словакия). Химический состав руд и вмещающих пород определялся аналитическими методами анализа: рентгенофлуоресцентным, индуктивно связанным, плазменным, масс-спектрометрическим.

Исследования проводились в соответствии с методическими документами научных советов по методам минералогических и аналитических исследований (НСОММИ и НСАМ).

Методология комплексной оценки минерального сырья требует исключительно количественных характеристик (минеральный и гранулярный состав, морфометрические параметры минералов, определяющие степень раскрываемости и коэффициент их раскрытия, реальный элементный состав, физические свойства), которые позволяют с высокой степенью надежности прогнозировать технологию его переработки и качество конечных продуктов. Поэтому в комплексе

минералогических методов анализа уверенно лидируют количественные методы (рентгенографический, оптико-минералогический, оптико-геометрический), позволяющие получить достоверную, сопоставимую, метрологически оцененную информацию.

В настоящее время метрологическое сопровождение минералогических работ (метрологический контроль) является самостоятельным направлением прикладной, в том числе технологической минералогии, со своими целями, структурой и основой метрологического обеспечения, с соблюдением требований системы контроля качества минералогических работ, включая регламенты контроля качества измерений, регламенты методик (создание и внедрение) количественного минералогического анализа, массовых (рутинных) анализов руд, горных пород, техногенных образований, включая полуколичественные методы и формирование средств метрологического контроля.

Работы в области метрологического сопровождения минералогических работ ведутся достаточно активно. Разрабатываются новые методические документы, актуализируются существующие документы, в которых приведены единые требования к точности измерений, к достоверности данных. Приоритетными сегодня стали научно-обоснованные документы по комплексу методов анализа конкретных полезных ископаемых. В последние годы в практику минералогических исследований активно внедряются межлабораторные сличительные испытания (МСИ), являющиеся инструментом оценки достоверности результатов анализов в отдельно взятой организации (лаборатории) и дающие наглядное представление о реальной точности используемых методик измерений.

Следует отметить, что минералогические работы в необходимом и достаточном объеме при прогнозной оценке качества сырья и его технологических испытаниях выполняются далеко не во всех организациях. Нередко геолого-разведочные, в том числе технологические, работы сопровождаются только аналитическими (химическими) данными, не позволяющими получить объективную полноценную информацию о руде (горной породе) в целом: минеральном составе, извлекаемых минералах, их взаимоотношениях и технологических свойствах, определяющих методы обогащения.

Результаты исследования и их обсуждение

Марганцевые руды. Карбонатные марганцевые руды характеризуются сложными взаимоотношениями слагающих их минеральных агрегатов и разновременными минеральными ассоциациями, что определяет их текстурно-структурный рисунок. Преобладающие первичные слоистые текстуры руд (неравномерно-, волнисто-, прерывисто-, линзовидно-слоистые текстуры) сочетаются с наложенными вкрапленными и прожилковыми текстурами. Структура руд неравномерно кристаллическая (от скрыто-до среднекристаллической) пан- и гипидиоморфнозернистая. Иногда отмечаются участки крупнокристаллического строения. Окисление карбонатных руд определяет появление текстур замещения: корковых, колломорфных, прожилковых.

Руды отличаются переменным содержанием марганца ($MnO_{общ}$ 22.12–32.13 %), зависящим прежде всего от соотношения в них марганцевых минералов, образующих собственные минеральные фазы — родохрозит, манганокальцит, силикаты и гидроксиды марганца, присутствующие в подчиненном количестве. Железо ($Fe_2O_{3общ}$.) связано с пиритом, пирротином и входит в виде изоморфной примеси в кристаллическую структуру марганцевых минералов. Высокое содержание CaO (19.71–22.20 %) определяется присутствием собственных минеральных фаз (кальцит, манганокальцит, доломит), а также пироксмангита, тодорокита, апатита и стильпномелана. Кремнезем (11.73–17.32 %) представлен кварцем, а также входит в состав силикатов марганца и слоистых силикатов. Содержание фосфора (P_2O_5) в руде достигает 0.32 %, минеральными формами фосфора являются апатит и кингсмаунтит.

Карбонатные руды полиминеральные, отличаются переменным содержанием в первую очередь минералов марганца. Главными рудными минералами являются карбонаты марганца: родохрозит (13–32 %), манганокальцит (15–24 %), марганцовистый кальцит и кальцит (15–28 %). Присутствие минералов непрерывного изоморфного ряда «кальцит – марганцовистый – кальцит – манганокальцит – Ca – родохрозит», которые весьма тесно ассоциируют между собой, определяет неоднородное строение карбонатных агрегатов и варьирующее содержание в них марганца, что подтверждено методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 1, a, b). Иногда отмечается достаточно высокое содержание (до 15 %) силикатов марганца (тефроит, бементит, пироксмангит), в основном образующих включения в карбонатах марганца, от которых невозможно полностью избавиться методами механического обогащения. При этом доля марганца непосредственно в карбонатных агрегатах не уменьшается. Вторичная марганцевая минерализация, развитая крайне неравномерно, связана с оксидами и гидроксидами марганца (псиломеланом, тодорокитом, рансьеитом). В рудах практически всегда в переменных количествах присутствуют кварц, стильпномелан, септохлорит, хлорит, тальк, пирротин, пирит, относящиеся к категории второстепенных минералов. Тем не менее эти минералы принимают активное участие в образовании гетерогенных существенно карбонатных агрегатов (рис. 1, c, d). Фосфорсодержащим минералом является акцессорный апатит, образующий тонкие включения в родохрозите, реже манганокальците и кингсмаунтите, идентифицированный в окисленном родохрозите методом микродифракции (просвечивающая электронная микроскопия).

Минералогические особенности руд однозначно свидетельствуют об их трудной обогатимости. В гетерогенных карбонатных агрегатах родохрозит обладает высокой степенью изрезанности границ, независимо от крупности зерен, что хорошо видно на рис. 1, d. Это определяет прочность сростков родохрозита с манганокальцитом, кальцитом, иногда с силикатами марганца и говорит о невозможности селективного выделения конкретных карбонатов марганца механическими методами обогащения. Обнадеживающие результаты, полученные при рентгенорадиометрической сепарации карбонатных руд, позволяют перспективы

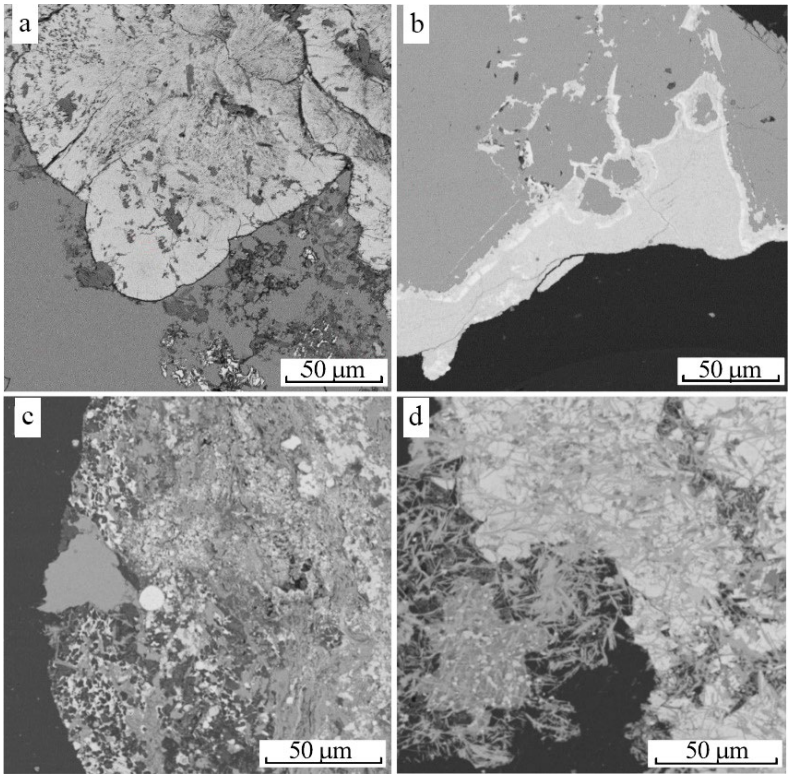

Рис. 1. Взаимоотношение марганцевых минералов в агрегатах (a, b): a — родохрозит (светло-серое) кальцит (серое), b — родохрозит (светло-серое), манганокальцит (серое), псиломелан (белое), c — полиминеральный хлорит-родохрозит-манганокальцитовый агрегат; d — полиминеральный агрегат существенно родохрозитового состава (справа), агрегат родохрозит-хлоритового состава (слева). СЭМ

Fig. 1. Relationships of manganese minerals in aggregates (a, b): a — rhodochrosite (light gray) calcite (gray), b — rhodochrosite (light gray), manganocalcite (gray), psilomelane (white), c — polymineral chlorite–rhodochrosite–manganocalcite aggregate; d — polymineral aggregate of essentially rhodochrosite composition (right), aggregate of rhodochrosite-chlorite composition (left). SEM

обогащения этих руд связывать именно с этим методом.

Бокситовые руды. Бокситы Верхне-Щугорского месторождения отличаются весьма сложным текстурно-структурным рисунком, обусловленным различным сочетанием структур минеральных агрегатов и взаимоотношением последних. При доминирующей роли пятнистых разноокрашенных бокситов фиксируются участки руды массивной, псевдоолитовой, брекчиевидной, конгломератовидной, вкрапленной (бобовой), колломорфной текстур. Структура — скрытокристаллическая (афанитовая и метаколлоидная).

Бокситы имеют переменный химический состав. Содержание главных рудообразующих компонентов — кремнезема и глинозема — варьирует в широких пределах, соответственно от 0.6 до 49.45 % и от 21.9 до 82.3 %; они входят в состав главных рудных и глинистых минералов. По содержанию железа (0.6–47.0 % Fe_2O_3), образующего собственные минеральные фазы (гетит, гидрогетит, гематит), четко выделяются три типа бокситов: низко-, средне- и высокожелезистые (НЖБ, СЖБ и ВЖБ). Изменение кремниевого модуля от 6.5 до 100, видимо, связано с процессами бокситизации и дебокситизации (шамотизации) в различных слоях латеритного профиля. Титан (0.8–3.3 % TiO_2) образует собственную фазу — рутил. Для руды типично повышенное содержание редких металлов, сумма которых составляет 0.47 %. При этом их самостоятельных фаз не обнаружено. Вероятно, они присутствуют в адсорбированной форме и связаны с оксидами и гидроксидами железа и марганца. По совокупности минералогических признаков — минеральному составу и текстурно-структурным характеристикам — выделено три минеральных типа руд: гематит-бемитовый, каолинит-диаспор-бемитовый и бемитовый.

Главным рудным минералом в бокситах всех типов является бемит (45–81 %), максимальное содержание которого отмечается в низкожелезистых бемитовых рудах. В среднежелезистых каолинит-диаспор-бемитовых бокситах к категории главных рудных минералов относится диаспор (15–20 %), в остальных бокситах содержание его не превышает 8 %, и встречается он не повсеместно. В подчиненном количестве присутствует гиббсит (0–6 %). Содержание гематита изменяется в значительных пределах, на его долю приходится в НЖБ — 4–5 %, СЖБ — 14–17 % и ВЖБ — 19–47 %. Гетит отмечается не всегда, содержание его фиксируется на уровне первых процентов и только в СЖБ его количество достигает 8 %. Иногда в бокситах наблюдается рутил (до 4 %), приуроченный преимущественно к гетит-гематитовым агрегатам.

Бемит присутствует в основном в виде тонкодисперсных агрегатов, не всегда имеющих четкие границы, сформированных плотно упакованными зернами пластинчатой формы. В тесной ассоциации с бемитом обычно встречается диаспор, индивиды которого имеют таблитчатую, пластинчатую или неправильную формы. Значительно реже в таких агрегатах методом

рентгенографического анализа идентифицируется гиббсит. В тесной ассоциации с минералами алюминия встречаются минералы железа (гетит, гидрогетит и гематит), отличающиеся, как правило, различной формой минеральных зерен и агрегатов (рис. 2, a, b), что в значительной степени усложняет текстурный рисунок в целом. Интересной особенностью полиминеральных существенно бемитовых агрегатов является сочетание микростроения формирующих их минералов: листоватого, чешуйчатого, тонкопластинчатого, лучистого, ажурного, концентрически-зонального (рис. 2, c–e), указывающее на то, что селективно выделить конкретные минералы будет невозможно.

Минералы железа участвуют в формировании полиминеральных агрегатов переменного состава, а также встречаются в виде индивидуализированных зерен или мономинеральных агрегатов. Гематит присутствует в виде зерен ромбоэдрической, таблитчатой и пластинчатой форм с неровными сглаженными очертаниями, нередко с четким зональным строением. В колломорфных образованиях гематит образует тонкие концентры (концентрические зоны). Гетит и гидрогетит встречаются преимущественно в полиминеральных агрегатах в тесном срастании с минералами алюминия без явных границ между зернами. Также отмечаются существенно гетитовые агрегаты с явными элементами концентрически-зонального сложения, иногда скорлуповатого. Строение метаколлоидное.

Выявленные минералогические особенности бокситов, их полиминеральный переменный состав и характер граничных взаимоотношений минералов определяют их трудную обогатимость. Извлечение минералов алюминия, железа и, возможно, титана представляет сложную задачу, что в первую очередь связано с природными текстурно-структурными особенностями бокситов, не позволяющими достичь полноценного раскрытия ценных минералов. В то же время кристаллохимические особенности минералов железа, распределение Fe^{2+} и Fe^{3+} по структурным позициям, определяющим магнитные свойства минералов, позволяют говорить о методах и подходах к изменению этих свойств. В данном случае можно рассматривать магнетизирующий обжиг для перевода оксигидроксидов железа (гетита и гематита) в магнетит и маггемит (Ожогина, Котова, 2024).

Повышенное содержание редких металлов в бокситах, несомненно, говорит об их комплексности. Сегодня первоочередной задачей в этой части оценки бокситов является выявление формы их нахождения. Большинство исследователей считают, что они присутствуют в сорбционной форме в тонкодисперсной полиминеральной матрице. Для подтверждения этого требуются прецизионные минералогические исследования. Только после этого можно однозначно говорить о технологиях извлечения редких металлов, например сорбционных. Следует отметить, что достоверная минералогическая информация позволит успешно решить вопросы утилизации отходов добычи и переработки бокситовых объектов, в которых отмечается значительное количество металла.

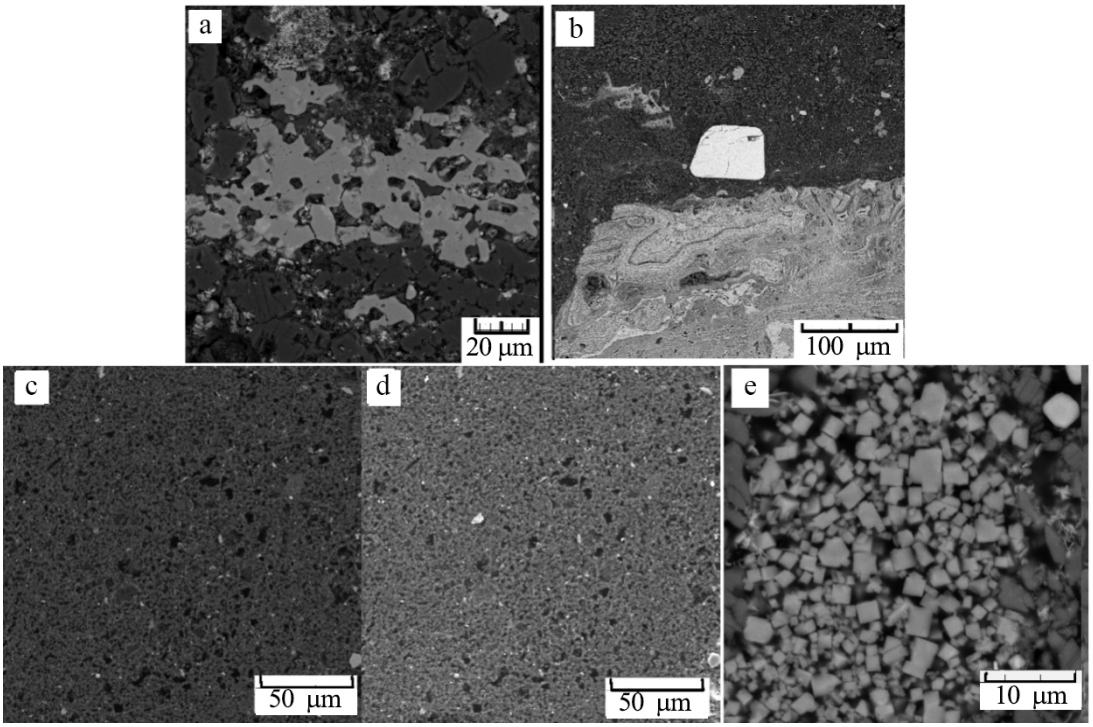

Рис. 2. Полиминеральные агрегаты, сформированные минералами алюминия и железа (a, b): a — гематит; b — скрытокристаллическая темно-серая верхняя часть —существенно бемитовая, серая колломорфная — гидроксиды железа, светло-серая — циркон; c, d — пористые агрегаты, имеющие тонкопластинчатое, тонкочешуйчатое лучистое микростроение: c — изображение в отраженных электронах, d — изображение во вторичных электронах; e — бемит пластинчатого микростроения, ассоциирующий с диаспором таблитчатого микростроения (режим отраженных электронов). СЭМ

Fig. 2. Polymineral aggregates formed by aluminum and iron minerals (a, b): a — hematite; b — cryptocrystalline dark gray upper part — essentially boehmite, gray colloform — iron hydroxides, light gray — zircon; c — porous aggregates with thin-plate, thin-flake radiant microstructure image in backscattered electrons, d —image in secondary electrons; e — boehmite of plate microstructure, associated with diaspore of tabular microstructure (backscattered electron mode). SEM

В связи с ограниченностью качественного бокситового сырья в России, относящегося к категории стратегического (О состоянии..., 2022), рассматривается возможность использовать в качестве источника алюминия альтернативные полезные ископаемые (нефелины, каолины, кианиты и др.) (Лихникевич и др., 2023). Например, каолины можно отнести к бедным рудам для производства глинозема (40 % Al_2O_3 и 57 % SiO_2), которые, однако, по содержанию глинозема и кремниевому модулю превосходят нефелиновые руды. Поэтому минералого-технологическая оценка каолинитовых глин месторождений бокситов Среднего Тимана позволит определить эффективные технологии извлечения алюминия. В то же время не стоит забывать о многоплановом использовании каолинов в других отраслях промышленности (Kotova, 2023; Голубева и др. 2023).

Заключение

На примере труднообогатимых руд марганца Усинского и алюминия Верхне-Щугорского месторождений, относящихся к категории стратегических полезных ископаемых, показано, что их глубокое минералогическое изучение комплексами методов позволило получить достоверную информацию о составе и строении этих руд, положенную в основу прогнозной оценки их качества. Владея максимально полными сведениями о минералогических особенностях этих руд, можно разрабатывать новые и совершенствовать существующие технологии переработки.

Для обеспечения технологической независимости России требуется создание полного цикла производства продукции — от сырья до конечного продукта. Совершенно очевидно, что в ближайшем будущем потребуется прогнозная оценка качества ряда полезных ископаемых, прежде всего стратегических, отечественные месторождения которых сегодня по разным причинам не осваиваются. Следовательно, необходимым и обязательным условием геологического изучения и промышленного освоения сырьевых объектов будут минералогические исследования, направленные на расширение минерально-сырьевой базы страны.

Природные особенности твердых полезных ископаемых, в большинстве своем отличающихся комплексностью, сложными морфоструктурными характеристиками, обусловленными их генезисом и дальнейшими преобразованиями, определяют необходимость применения расширенного комплекса методов минералогического анализа, метрологически оцененных, позволяющих получать достоверную информацию об объекте. Значит, будут разрабатываться новые и совершенствоваться существующие приемы, операции, методы анализа применительно к конкретным рудам и горным породам. При этом однозначно повысится роль прецизионных исследований, позволяющих на более высоком уровне выявлять, изучать и оценивать минералогические особенности полезных ископаемых, влияющих на их обогатимость.

Работа в части исследования бокситов Верхне-Щугорского месторождения выполнена в рамках государственного задания Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и с использованием оборудования ЦКП «Геонаука».

Литература / References

Вайсберг Л. А., Козлов А. П. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. 2014. № 2. С.79–84.
Weisberg L. A., Kozlov A. P. Priority areas of research in the field of processing mineral raw materials. Ore dressing, 2014, No. 2, pp. 79–84. (in Russian)

Голубева О. Ю. и др. Наноархитектоника слоистых алюмосиликатов как основа создания новых функциональных материалов для решения актуальных задач медицины и экологии // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14. № 1. С. 74–80. DOI:10.37614/2949-1215
Golubeva O. Yu. et al. Nanoarchitectonics of layered aluminosilicates as a basis for creating new functional materials for solving urgent problems of medicine and ecology Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical sciences, 2023, V. 14, No. 1, pp. 74–80. DOI: 10.37614/2949-1215 (in Russian)

Иванова М. В., Астахова Ю. М., Сорокин Е. М. и др. Особенности раскрытия минералов железа в рудах Серовского месторождения // Разведка и охрана недр. 2015. № 3. С. 34–41.
Ivanova M. V., Astakhova Yu. M., Sorokin E. M., et al. Features of the disclosure of iron minerals in the ores of the Serovskoye deposit. Exploration and protection of subsoil, 2015, No. 3, pp. 34–41. (in Russian)

Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2020): Материалы междунар. конференции. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020.
Innovative processes of complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksin Readings — 2020): Proceedings of the International Conference. Apatity: FRC KSC RAS, 2020. (in Russian)

Лихникевич Е. Г., Пермякова Н. А., Рогожин А. А. Отечественное каолиновое сырье: технологические перспективы // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2023). М., 2023. С. 62–64.
Likhnikevich E. G., Permyakova N. A., Rogozhin A. A. Domestic kaolin raw materials: technological prospects. Modern problems of complex and deep processing of natural and non-traditional mineral raw materials (Plaksin Readings — 2023). Moscow, 2023, pp. 62–64. (in Russian)

Наумов В. А., Наумова О. Б., Брюхов В. Н., Голдырев В. В., Голдырев В. Н., Плюснина К. И. Природоподобные технологии на пути освоения техногенно-минеральных образований // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского: Сб. науч. ст. Пермь: ПГНИУ. 2022. Вып. 25. С. 181–187.
Naumov V. A., Naumova O. B., Bryukhov V. N., Goldyrev V. V., Goldyrev V. N., Plyusnina K. I. Nature-like technologies for the development of technogenic mineral formations. Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky: collection of scientific articles. Perm: Perm State National Research University. 2022, 25, pp. 181–187. (in Russian)

Нохрина О. И., Рожихина И. Д., Рыбенко И. А., Голодова М. А., Израильский А. О. Гидрометаллургическое обогащение полиметаллических и железомарганцевых руд //

Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 273–281. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-273-281

Nokhrina O. I., Rozhikhina I. D., Rybenko I. A., Golodova M. A., Izrailsky A. O. Hydrometallurgical enrichment of polymetallic and ferromanganese ores. News of universities. Ferrous metallurgy, 2021, V. 64, No. 4, pp. 273–281. (in Russian)

Ожогина Е. Г., Котова О. Б. Достижения, проблемы, перспективы технологической минералогии руд стратегических металлов // Плаксинские чтения — 2020: Материалы междунар. конф. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2024. С. 54–56.

Ozhogina E. G., Kotova O. B. Achievements, problems, prospects of technological mineralogy of strategic metal ores. (Plaksin Readings — 2020): Proceedings of the International Conference. Apatity: FRC KSC RAS, 2024, pp. 54–56. (in Russian)

О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году: Государственный доклад. М.: ВИМС, 2022. 623 с.

On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021: State report. Moscow: VIMS, 2022, 623 p. (in Russian)

Christy, A. G., Mills, S. J., Kampf, A. R., Houseley, R. M., Thorne, B., and Marty, J. (2016) The relationship between mineral composition, crystal structure and paragenetic sequence: the case of secondary Te mineralization at the Bird Nest druft, Otto Mountain, California, USA. Mineralogical Magazine, 80, 291–310.

Kotova O. B., Ustyugov V. A., Sun Shiyong, Ponaryadov A. V. Mullite production: phase transformations of kaolinite, thermodynamics of the process // Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 254. P.129-135. DOI: 10.31897/PMI.2022.43

Ozhogina E. G., Kotova O. B. How technological mineralogy can solve problems of integrated processing of mineral raw, Sustainable Development of Mountain Territories, 2021, №2 (48), pp. 170–179. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-170-178

Ozhogina, E. G., Kotova, O. B. New methods of mineral processing and technology for the progress of sustainability in complex ore treatment // IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress. 2019. Moscow. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (2-s2.0-85059377649) P. 32–40. https://elibrary.ru/item.asp?id=37216799.

Razmyslov I. N., Kotova O. B., Silaev V. I., Rostovtsev V. I., Kiseleva D. V., and Kondratyev S. A. Microphaseheterogenization of ferrous bauxites as a result of radiation and heat treatment, J. Min. Sci., 2019, vol. 54, no. 5, pp. 138–153. DOI:10.1134/S1062739119056185

Vakhrushev A. V., Kotova O. B., Lyubinsky I. F. Bauxites of the Timan region: new methods and means of complex processing. Exploration and protection of subsurface resources. 2009, No. 11, pp. 53–57.

Поступила в редакцию / Received 18.09.2024

УДК 548.71 + 581.452 DOI: 10.19110/geov.2024.10.4

Из опыта преподавания. XV. Кристаллографические бордюры и филлотаксис

Ю. Л. Войтеховский, А. Д. Гунченкова

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия
vojtehovskijj@herzen.spb.ru

Филлотаксис — упорядоченное расположение листьев на стеблях и ветках растений. Его причина состоит в том, что каждый вид в ходе эволюции оптимизировал световой поток для каждого листа. Найденный оптимум закрепился в генотипе и стал фенотипическим признаком. Возможность применения идей кристаллографии в ботанике показана О. Браве. В данной статье предложено описывать расположения листьев на горизонтальной ветке в терминах теории бордюров. Теоретически непротиворечивыми оказались все семь возможных типов бордюров. Предложенная номенклатура в терминах операций симметрии строго фиксирует ортогональное и косое расположение симметричных и асимметричных листьев на ветке. Для всех типов бордюров установлены ботанические прототипы.

Ключевые слова: *кристаллография, систематика и иерархия бордюров, филлотаксис*

From teaching experience. XV. Crystallographic borders and phyllotaxis

Yu. L. Voytekhovsky, A. D. Gunchenkova

A. I. Herzen Russian State Pedagogical University, Saint Petersburg, Russia

Phyllotaxis is an orderly arrangement of leaves on plant stems and branches. Its origin is that each species in the course of evolution optimized the light flux for each leaf. The found optimum was fixed in the genotype and became a phenotypic trait. The possibility to use the crystallographic ideas in botany was shown by A. Bravais. The given paper proposes to describe the arrangement of leaves on a horizontal branch in terms of the theory of borders. All seven possible types of borders are found to be theoretically consistent. The suggested nomenclature in terms of symmetry operations strictly fixes straight and oblique arrangement of symmetrical and asymmetrical leaves on branches. Botanical prototypes have been established for all types of borders.

Keywords: *crystallography, systematics and hierarchy of borders, phyllotaxis*

Введение

Поводом для написания данной статьи явилось предположение о возможности применения теории бордюров в ботанике, опираясь на такое явление, как филлотаксис.

Филлотаксис — упорядоченное расположение листьев на стеблях и ветках растений. На него обратили внимание уже в древности. В научной форме его пытался описать Л. да Винчи на рубеже XV и XVI вв. И. Кеплер в 1611 г. упоминает его в сочинении «О шестиугольных снежинках» (Кеплер, 1982). Ш. Бонне в 1754 г. обнаружил в спиральном филлотаксисе некоторых растений золотое сечение. А. Браун в 1830 г. и К. Ф. Шимпер в 1835 г. выполнили систематические измерения. А братья О. и Л. Браве в 1837 г. не только связали спиральный филлотаксис с рядами Фибоначчи, но и доказали с ним ряд теорем. Поиски способов математического описания обратили внимание ботаников на активно развивавшуюся науку о правильных формах кристаллов. Закономерно, что О. Браве прославился и здесь, найдя в 1848 г. 14 решеток — фундаментальный результат, описывающий трансляционное упорядочение кристаллов (Браве, 1974).

Объяснение филлотаксиса состоит в том, что каждый вид растения в ходе эволюции решал задачу оптимизации светового потока и обеспечения фотосинтеза в каждом листе. Оптимумы закрепились в генотипах и стали видовыми фенотипическими признаками. На практике издавна используются вербальные описания расположений листьев на стебле и ветке: очередное, супротивное, кососупротивное, кольчатое, мутовчатое… (Горянинов, 1841; Ванин, 1967; Буданцев, Яковлев, 2006; Сорокина, Бубырева, 2010; Шишкин, 2020; Пескова, 2022). Но если винтовой филлотаксис на стебле отмечен указанной выше математической теорией (по сути, сводящейся к винтовым осям разрешенных и запрещенных в кристаллографии рациональных, и, может быть, даже иррациональных порядков), то для листьев на горизонтальной ветке тем дело и заканчивается. Математическая морфология растений перешагнула эту проблему и поспешила далее. Между тем для этого случая подходит кристаллографическая теория бордюров.

Кристаллографические бордюры

Напомним, что в кристаллографии бордюром называется линейно упорядоченный (ритмично повторяющийся) односторонний орнамент (Шубников, 1940; Вайнштейн, 1979). Всякий бордюр состоит из одинаковых кластеров, полученных из асимметричного эле-

Для цитирования: Войтеховский Ю. Л., Гунченкова А. Д. Из опыта преподавания. XV. Кристаллографические бордюры и филлотаксис // Вестник геонаук. 2024. 10(358). С. 35—39. DOI: 10.19110/geov.2024.10.4

For citation: Voytekhovsky Yu. L., Gunchenkova A. D. From teaching experience. XV. Crystallographic borders and phyllotaxis. Vestnik of Geosciences, 2024, 10(358), pp. 35—39, doi: 10.19110/geov.2024.10.4

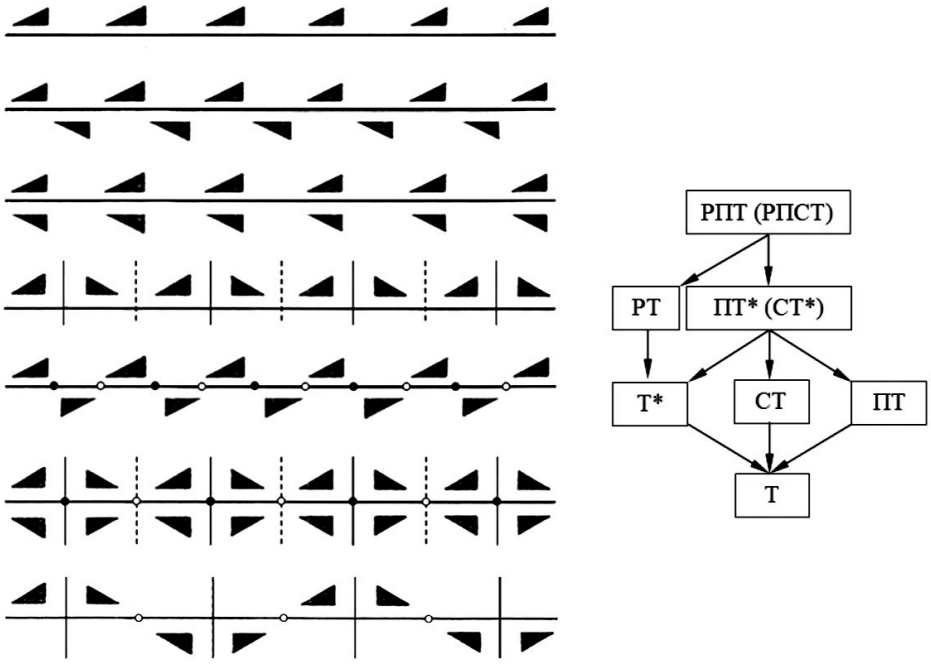

Рис. 1. 7 типов бордюров (сверху вниз: Т, Т*, РТ, ПТ, СТ, РПТ, ПТ*) и их иерархия

Fig. 1. 7 types of borders (from top to bottom: T, T*, PT, ПТ, СТ, РПТ, ПТ*) and their hierarchy

мента одной или несколькими операциями симметрии, совместимыми с односторонней полосой. Им отвечают элементы симметрии: продольная плоскость Р, поперечная П, центр инверсии С на их пересечении и без них (во всех случаях эквивалентен оси L_2, ортогональной к полосе), конечная трансляция Т и плоскость скользящего отражения Т* (композиция Т и отражения в Р на половине шага трансляции). Теория сводится к тому, чтобы исходный асимметричный элемент размножить в бордюр всеми возможными комбинациями этих операций. В двух простейших случаях элемент порождает бордюры операциями Т и Т*. Доказано, что всего возможны 7 бордюров (рис. 1, слева).

Это кажется невероятным ввиду огромного разнообразия линейных орнаментов, окружающих нас в природе и дизайне. Но все это разнообразие представлено в устройстве исходного элемента, обозначенного на рис. 1 асимметричным треугольником. Сплошными линиями показаны: направление трансляции Т, совпадающий с ним след Р и плоскости П в кластерах, штрихами — дополнительные плоскости П, появляющиеся между кластерами в силу теорем. Черными кружками показаны центры инверсии С в кластерах; белыми — дополнительные центры между ними. Каждый бордюр назван минимально достаточным или полным списком порождающих операций симметрии (Войтеховский, 2020).

Бордюры соподчинены нетривиальным образом (рис. 1, справа). Иерархию легко установить сравнением названий. Надо лишь иметь в виду, что операция Т входит в Т*, а Т* — в композицию РТ. По стрелкам от высшей группы симметрии РПТ (полное имя — РПСТ, центр инверсии С появляется автоматически на пересечении Р и П; аналогично бордюр ПТ* имеет второе имя — СТ*) можно разными путями спуститься к низшей группе Т. Она самая простая в схеме, но в математическом смысле нетривиальна. Иерархия подгрупп любой группы (в нашем случае — группы симметрии РПТ) должна завершиться тривиальной подгруппой Е (подобной 1 при умножении чисел). У нас она отвечает не бордюру, а неупорядоченному линейному узору и имеет ясную ботаническую интерпретацию — незакономерное расположение листьев на ветке.

Ботанические бордюры

Кристаллографические бордюры — односторонние орнаменты. Именно это позволяет использовать их для описания ритмичных расположений листьев (у которых верхняя, то есть обращенная к солнцу, сторона радикально отлична от нижней) на горизонтальной ветке, когда все они условно лежат в одной плоскости. Но возможны варианты: 1) лист расположен косо к ветке по ходу ее роста, и тогда неважно, симметричен он или асимметричен; 2) лист ортогонален к ветке, и тогда важно, он симметричен (2а) или асимметричен (2б). Случай 1 согласуется с бордюрами Т, Т*

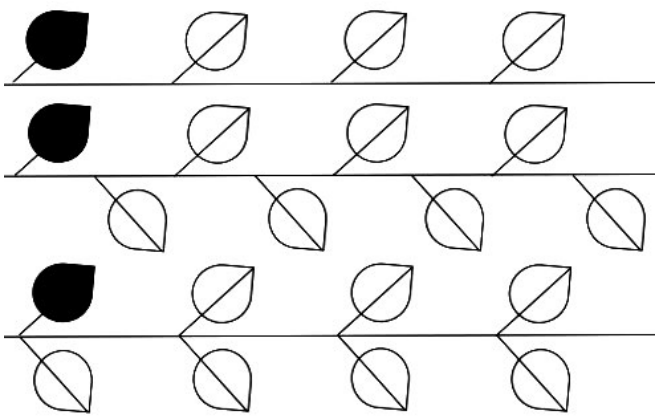

Рис. 2. Симметричный лист, косое расположение. Сверху вниз: Т, Т* и РТ

Fig. 2. Symmetrical leaf, oblique arrangement. From top to bottom: T, T*, and PT

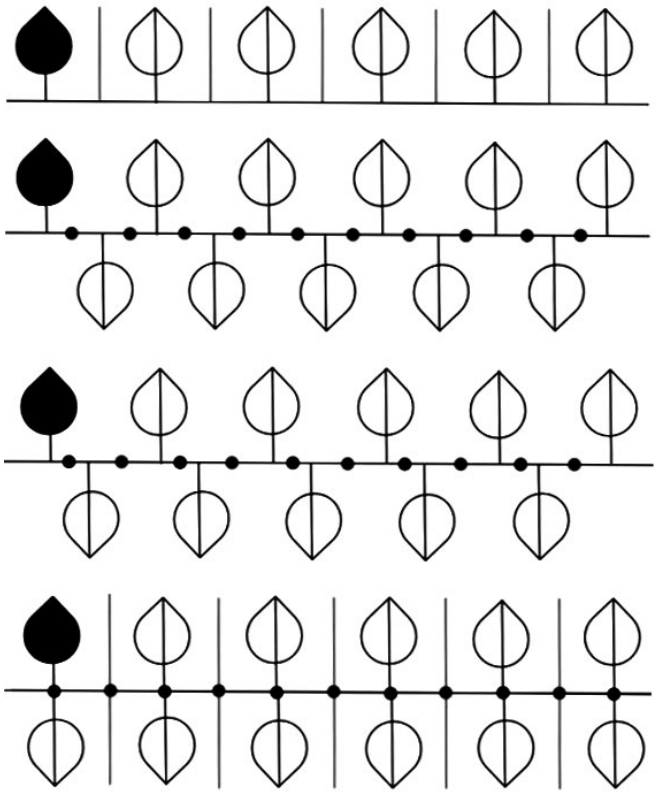

Рис. 3. Симметричный лист, прямое расположение. Сверху вниз: ПТ, ПТ*, СТ и РПТ

Fig. 3. Symmetrical leaf, straight arrangement. From top to bottom: ПТ, ПТ*, СТ and РПТ

и РТ (рис. 2). Черным показан лист, с которого начинается построение бордюра. Другие варианты противоречивы — в них правильное положение листа сочетается с обратным. В случае 2а лист состоит из асимметричных половинок, связанных плоскостью П, и с точки зрения теории бордюров должен рассматриваться как кластер. Он сочетается с бордюрами ПТ, ПТ*, СТ и РПТ (рис. 3). Бордюры ПТ* и СТ похожи. Но в ПТ* каждый нижний (верхний) лист расположен строго посередине между верхними (нижними). В СТ кластер из двух противоположно ориентированных листьев транслируется на произвольный шаг. Случай 2б с точки зрения симметрии сводится к варианту 1.

Рис. 1 (справа) показывает, как бордюры соподчинены по группе симметрии, обычно сопоставляемой с совершенством организации. Если в кристаллографии это не привносит смысловых искажений, то в ботанике может быть рискованно, а то и недопустимо. Эволюционные стратегии растений столь сложны, что, скорее всего, их морфологию нельзя выстраивать на лестнице совершенства, ориентируясь только на симметрию расположения листьев. Достаточное применение предлагаемого подхода — точная фиксация таких расположений в рамках строгой исчерпывающей систематики.

Природные прототипы

Несложно найти реальные прототипы всех ботанических бордюров в парках и ботанических садах Санкт-Петербурга (рис. 4, 5). У хамедореи Зейфрица (рис. 4) за элемент повторяемости следует принять пару листьев, близко прирастающих по разные стороны ветки, но всегда разделенных небольшим интервалом. Более сложная интерпретация — допустить, что изначально листья растут ортогонально ветке (бордюр СТ, рис. 3) и наклоняются к ней по мере роста. Вопрос требует изучения. Но показательно, что точная фиксация ситуации породила вопрос об онтогенезе растения. У вербейника монетного (рис. 5) тип ПТ принят на том основании, что его мутовки из двух листьев ориентированы вверх и обладают внутренней симметрией, но может быть оспорен. О частоте разных бордюров у растений говорить рано. По нашим данным, типы Т* и РТ самые частые, тип ПТ наиболее редок, что и не позволило дать более убедительный пример.

Чередование типов

При внимательном рассмотрении сложноустроенных (перистых) листьев, их расположений на веточках, а тех — на ветках предыдущего порядка (более крупных) можно видеть сохранение или изменение типов бордюров. Ситуацию удобно фиксировать в предложенной номенклатуре. Так, сохранение типа имеет место у кизильника (*Cotoneáster sp*.) Т* → Т* и бузины чёрной (*Sambúcus nigra*) — РПТ → РПТ. У робинии псевдоакациевой (*Robinia pseudoacacia*) замечено измене-

Рис. 4. Косое расположение, слева направо: Т — хамедорея (*Chamaedorea seifrizii*), Т* — кизильник (*Cotoneáster sp*.), РТ — церцидифиллюм (*Cercidiphyllum japonicum*)

Fig. 4. Oblique arrangement, from left to right: Т — *Chamaedorea seifrizii*, Т* — *Cotoneáster sp.*, РТ — *Cercidiphyllum japonicum*

Рис. 5. Прямое расположение, слева направо: ПТ — вербейник (*Lysimachia nummularia*), ПТ* — кочедыжник (*Athyrium filix-femina*), СТ — замиокулькас (*Zamioculcas zamiifolia*), РПТ — вика (*Vicia sepium*)

Fig. 5. Straight arrangement, from left to right: ПТ — *Lysimachia nummularia*, ПТ* — *Athyrium filix-femina*, СТ — *Zamioculcas zamiifolia*, РПТ — *Vicia sepium*

Рис. 6. Чередование типов расположения (слева направо): Т* → Т* — кизильник (*Cotoneáster sp.*), РПТ → РПТ — бузина чёрная (*Sambúcus nigra*), ПТ* → [СТ + РПТ] — робиния псевдоакациевая (*Robinia pseudoacacia*), Т* → [РПТ → ПТ* → Т*] — кочедыжник женский (*Athyrium filix-femina*)

Fig. 6. Alternating arrangement types (from left to right): Т* → Т* — *Cotoneáster sp.*, РПТ → РПТ — *Sambúcus nigra*, ПТ* → [СТ + РПТ] — *Robinia pseudoacacia*, Т* → [РПТ → ПТ* → Т*] — *Athyrium filix-femina*

ние типа, причем двоякое: ПТ* → [СТ + РПТ]. Особый интерес представляют папоротники, прославленные как геометрические фракталы (Мандельброт, 2002). Но это не всегда так. У кочедыжника женского (*Athyrium filix-femina*) нами установлена череда типов вдоль последней веточки: Т* → [РПТ → ПТ* → Т*] (рис. 6). Два последних примера показывают, что фенотип вида согласуется с лабильностью индивида. Она позволяет оптимизировать освещенность листьев их небольшими сдвигами и наклонами вдоль ветки (оси трансляции). Все эти нюансы легко фиксируются номенклатурой бордюров.

Заключение

Итак, для описания расположений листьев на условно горизонтальной ветке теоретически непротиворечивы все 7 кристаллографических бордюров. Номенклатура по порождающим операциям симметрии однозначно фиксирует прямое положение симметричного листа (ПТ, СТ, РПТ, ПТ*) или косое симметричного и асимметричного (Т, Т*, РТ). Сбой периодичности в положении листьев по шагу трансляции Т или отсутствие листа в нужном месте бордюра означает, что природа избрала иной путь рациональности для оптимизации светового потока для каждого листа. Этот тип организации выше отмечен как тривиальная группа симметрии. Все прототипы бордюров установлены авторами в природе.

Выше неявно предполагалось, что листья вдоль ветки имеют одинаковый размер. Это в общем не так — в направлении роста ветки их размер уменьшается. И тогда для описания можно применить симметрию подобия (Шубников, 1960). Плоскость симметрии листа, косо ориентированного к ветке, можно принять за плоскость гомологии (Михеев, 1961). Листья на дугообразной ветке можно описать в терминах криволинейной симметрии (Наливкин, 1925, 1951, Падуров, 1926; Шафрановский, 1979). Для описания расположений листьев на стеблях уже используются винтовые оси. Кристаллография дает для этого стройную теорию (Вайнштейн, 1979). Наконец, вместо одного листа природа предлагает кластеры-мутовки (соцветия, несколько листьев, лист с иглой и т. д.). Считать их элементами бордюра или относить такую организацию к тривиальной группе симметрии — вопрос открытый. В последнем случае важно понять, как природа оптимизировала световой поток, избежав бордюра в расположении листьев.

Формирование кроны — сложный процесс. Ветви и листья на них поворачиваются к свету, мешая соседям и испытывая помехи. Описание этого процесса

много сложнее астрономической «задачи трех тел», которая в общем случае не имеет решения в конечных аналитических выражениях. А деревья раз за разом строят могучие кроны, удивляя нас изгибами сотен ветвей и шелестом тысяч листьев. Достойно удивления, что нам удается найти во всем этом хоть какие-то закономерности.

Авторы благодарят рецензентов за замечания, способствовавшие лучшему изложению результатов.

Литература / References

Браве О. Избранные научные труды. Кристаллографические этюды. Л.: Наука, 1974. 419 с.
Bravais A. Selected scientific works. Crystallographic etudes. Leningrad: Nauka, 1974, 419 p. (in Russian)

Буданцев А. Л., Яковлев Г. П. Иллюстрированный определитель растений Ленинградской области. М.: Изд-во КМК, 2006. 799 с.
Budantsev A. L., Yakovlev G. P. Illustrated identifier of plants of the Leningrad region. Moscow: KMK Press, 2006, 799 p. (in Russian)

Вайнштейн Б. К. Современная кристаллография. Т. 1. Симметрия кристаллов, методы структурной кристаллографии. М.: Наука, 1979. 384 с.
Weinstein B. K. Modern crystallography. Vol. 1. Symmetry of crystals, methods of structural crystallography. Moscow: Nauka, 1979, 384 p. (in Russian)

Ванин А. И. Определитель деревьев и кустарников. М.: Лесная промышленность, 1967. 236 с.
Vanin A. I. Identifier of trees and shrubs. Moscow: Forest Industry Press, 1967, 236 p. (in Russian)

Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. VI. Симметрия бордюров // Вестник геонаук. 2020. № 8(308). С. 28–31. DOI:10.19110/geov.2020.8.4
Voytekhovsky Yu. L. From the experience of teaching. VI. Symmetry of borders. Vestnik of Geosciences, 2020, 8(308), pp. 28–31. DOI:10.19110/geov.2020.8.4 (in Russian)

Горянинов П. Основания ботаники. СПб., 1841. 375 с.
Goryaninov P. Foundations of Botany. Saint Petersburg, 1841, 375 p. (in Russian)

Кеплер И. О шестиугольных снежинках. М.: Наука, 1982. 192 с.
Kepler I. About hexagonal snowflakes. Moscow: Nauka, 1982, 192 p. (in Russian)

Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Ин-т комп. исслед., 2002. 656 с.
Mandelbrot B. Fractal geometry of nature. Moscow: Inst. of Comp. Research, 2002, 656 p. (in Russian)

Михеев В. И. Гомология кристаллов. Л.: Гостоптехиздат, 1961. 208 с.
Mikheev V. I. Homology of Crystals. Leningrad: Gostoptekhizdat, 1961, 208 p. (in Russian)

Наливкин Д. В. Элементы симметрии органического мира // Изв. Биол. научно-иссл. ин-та при Пермском ун-те. 1925. Т. 3. Вып. 8. С. 291–297.
Nalivkin D. V. Elements of symmetry of the organic world. Izv. Biol. Sci. Res. Inst. at Perm Univ., 1925, V.3, 8, pp. 291–297. (in Russian)

Наливкин Д. В. Криволинейная симметрия // Кристаллография. Труды Федоровской научной сессии 1949 г. Л.: ЛГИ, 1951. С. 15–23.
Nalivkin D. V. Curvilinear symmetry. Crystallography. Proc. Fedorov Sci. Session 1949, Leningrad: Mining Inst., 1951, pp. 15–23. (in Russian)

Падуров Н. Н. О криволинейной симметрии // Зап. Рос. минерал. об-ва. 1926. Ч. 55. Вып. 2. С. 314–334.
Padurov N. N. On curvilinear symmetry. Proc. Russ. Mineral Soc., 1926, 55(2), pp. 314–334. (in Russian)

Пескова И. М. Деревья и кустарники России. Определитель. М.: Аванта, 2022. 96 с.
Peskova I. M. Trees and shrubs of Russia. Identifier. Moscow: Avanta, 2022, 96 p. (in Russian)

Сорокина И. А., Бубырева В. А. Атлас дикорастущих растений Ленинградской области. М.: Изд-во КМК, 2010. 666 с.
Sorokina I. A., Bubyreva V. A. Atlas of wild plants of the Leningrad region. Moscow: KMK Press, 2010, 666 p. (in Russian)

Шафрановский И. И. Учение о криволинейной симметрии по Д. В. Наливкину // Зап. Горного ин-та. 1979. Т. 81. С. 55–60.
Shafranovsky I. I. The doctrine of curvilinear symmetry by D. V. Nalivkin. Proc. Mining Inst., 1979, V. 81, pp. 55–60. (in Russian)

Шишкин Б. К. Ботанический атлас. М.: Книга по требованию, 2020. 499 с.
Shishkin B. K. Botanical atlas. Moscow, Book on Demand, 2020, 499 p. (in Russian)

Шубников А. В. Симметрия. М.–Л.: Изд. АН СССР, 1940. 176 с.
Shubnikov A. V. Symmetry. Moscow–Leningrad: Acad. Sci. of USSR, 1940, 176 p. (in Russian)

Шубников А. В. Симметрия подобия // Кристаллография. 1960. Т. 5. № 4. С. 489–496.
Shubnikov A. V. Symmetry of similarity. Crystallography, 1960, V. 5, 4, pp. 489–496. (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 11.06.2024

Краткое сообщение • Short report

УДК 549.88: 552.122: 537.874 DOI: 10.19110/geov.2024.10.5

Влияние толщины пластин шунгита на его электрофизические свойства: технологический и геофизический аспекты

Е. А. Голубев[1], И. В. Антонец[2]

[1] Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
yevgenygolubev74@mail.ru
[2] Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия

В этом кратком сообщении представлены результаты исследования влияния толщины образцов шунгитов (как шунгитовых пород, так и жильных форм, сопоставляемых с высшими антраксолитами) на их электрофизические свойства. Исследование было проведено путем измерения импеданса в диапазоне частот 0.05–15 МГц. Изучались образцы шунгитов из разных проявлений, содержание углерода в которых составляло 96, 95, 73 и 38 ат. %, а толщина варьировалась от 5 мм до 12–15 мкм. Обнаружен значительный рост сопротивления при уменьшении толщины образца до 100 мкм и менее. При этом происходит смена характерного для макрообразцов шунгитов индуктивного типа сопротивления на емкостный, либо остается только активное сопротивление. Таким образом, показано, что не только общее содержание, но и форма и размерность проявления такого углерода влияет на электрофизические свойства породы. Полученные результаты могут быть использованы для интерпретации данных электроразведки горных пород, содержащих разупорядоченный углерод (шунгиты, антраксолиты) в жильной и линзовидной формах, а также для разработки функциональных материалов из такого углерода.

Ключевые слова: *шунгиты, электрофизические свойства, импеданс, микроструктура*

Effect of shungite plate thickness on its electrophysical properties: technological and geophysical aspects

Ye. A. Golubev[1], I. V. Antonets[2]

[1] Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia
[2] Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

This brief report presents the results of our study of the effect of shungite sample thickness (both shungite rocks and vein forms comparable to higher anthraxolites) on their electrophysical properties. The study was conducted by measuring impedance in the frequency range of 0.05–15 MHz. Shungite samples with a carbon content of 96, 95, 73, and 38 at. % and a thickness ranging from 5 mm to 12–15 μm were studied. A significant increase in resistance was found with a decrease in sample thickness to 100 μm or less. In this case, the inductive resistance typical of shungite macrosamples changes to capacitive resistance or only active resistance appears. Thus, it is shown that not only the total content, but also the form and dimensionality of the occurrence of such carbon affects the electrophysical properties of the rock. The obtained results can be used to interpret electrical exploration data of rocks containing disordered carbon (shungites, anthraxolites) in vein and lenticular form, and also to show new prospects for the use of such carbon in the development of functional materials.

Keywords: *shungite, electrophysical properties, impedance, microstructure*

Введение

Природные формы sp^2 гибридизированного углерода имеют разную структурную упорядоченность — от близкого к идеальному представлению графита до турбостратного графитоподобного стеклоуглерода, и при этом имеют хорошую проводимость (~ 10^2–10^4 См/м) вне зависимости от их структурной упорядоченности (Golubev, Antonets, 2022). Это свойство достаточно широко используется в геофизических исследованиях, а также определяет перспективность применения природных углеродсодержащих веществ в современных технологиях (Vieira, 2022).

Фазовый и минеральный состав, текстурно-структурное строение являются ключевыми факторами, определяющими величину и тип электрического сопротивления горной породы (Пархоменко, 1965; Ерофеев, 1994). Эти параметры являются основными при интерпретации результатов электроразведочных методов, таких как метод сопротивления, радиопросвечивание, скважинная разведка, для дифференциации пород. Электропроводность позволяет наиболее контрастно дифференцировать горные породы и используется как главный параметр в большинстве методов электроразведки (Семенов, 1968; Якубовский, 1980). Присутствие углерода в форме графита разной степени упорядоченности существенно снижает сопротивление многих горных пород, в частности гнейсов, песчаников и сланцев (Гречухин, 1980; Kulikov et al., 2021). Высокая проводимость углеродистого вещества как с графитовой структурой, так и с разупорядо-

Для цитирования: Голубев Е. А., Антонец И. В. Влияние толщины пластин шунгита на его электрофизические свойства: технологический и геофизический аспекты // Вестник геонаук. 2024. 10(358). С. 40–45. DOI: 10.19110/geov.2024.10.5

For citation: Golubev Ye. A., Antonets I. V. Effect of shungite plate thickness on its electrophysical properties: technological and geophysical aspects. Vestnik of Geosciences, 2024, 10(358), pp. 40–45, doi: 10.19110/geov.2024.10.5

ченной графитоподобной делает существенным влияние таких включений даже в малой их концентрации на электрофизические характеристики горных пород, особенно имеющих низкую собственную проводимость. Например, показано влияние текстурно-структурного строения шунгитовых пород на их электропроводность и, соответственно, на результаты геофизических измерений, а также на радиофизические свойства (Зайцев, Ковалевский, 2005; Голубев, Антонец, 2017).

При этом шунгитовый углерод со структурной точки зрения характеризуется как разупорядоченный графитоподобный углерод, а жильные его формы сопоставимы с широко распространенными в земной коре антраксолитами (только на территории России это, например, антраксолиты Кольского п-ова, Полярного и Приполярного Урала, Новой Земли, многочисленных проявлений в Сибири (Филиппов, 2013)), имеющих схожую структуру углерода и хорошие проводящие свойства. Некоторые авторы (В. А. Успенский, В. Ф. Пеньков, М. М. Филиппов) рассматривают высокоуглеродистый шунгит как высший антраксолит. Антраксолиты часто заполняют трещины и стилолитовые швы в породах, формируя как моно-, так и полиминеральные жилы, при этом их размеры распределяются в широком диапазоне — от десятков сантиметров до единиц и долей микрометра (Филиппов, 2013). Вместе с тем антраксолиты часто связаны с проявлениями нефти, что придает дополнительную актуальность проблеме оценки электрофизических свойств таких веществ. Кроме того, электропроводностью обладают и антрациты, залегающие пластами разной мощности.

Если о влиянии толщины слоя графита, вплоть до его моноатомного слоя (графена), на электрофизические свойства имеется многочисленная теоретическая и экспериментальная информация, количество которой лавинообразно растет после осуществления возможности изучения графена (Novoselov et al., 2004; Морозов и др., 2008), то о влиянии толщины слоя на проводящие свойства разупорядоченного углерода данные практически отсутствуют. В настоящее время шунгиты вызывают большой материаловедческий интерес в связи с высоким потенциалом применения углеродных материалов в различных технологических процессах при создании экранирующих материалов, аккумуляторов, суперконденсаторов, электрохимических и термических датчиков (Kovalevski, 2008; Chou et al., 2018; Vieira. 2022; Golubev, Antonets, 2022). Наполнители из разных форм углерода (графен, нанотрубки, фуллерены) используются в композитных материалах, причем многие приложения требуют малой (вплоть до микрометров) толщины таких материалов (Chung, 2001; 2012; Thomassin et al., 2013; Gupta, Tai, 2019). Шунгитовый углерод в многочисленных работах использовался как проводящий наполнитель для создания экранирующих материалов на основе полимеров либо как спрессованный порошок. Электрофизические свойства шунгитовых пород изучались на макрообразцах или образцах из спрессованного шунгитового порошка (Berezkin, et al., 1997; Kovalevski, et al., 2005; Lyn'kov, et al., 2009; Golubev, 2013; Emelyanov, et al., 2013; Moshnikov, Kovalevski, 2016). В работах (Golubev et al., 2019; Antonets et al., 2021) была описана интересная особенность экранирования шунгитовыми породами: изготовленные из них пластинки толщиной от миллиметра до 100 микрометров отражают почти 100 % падающего СВЧ-излучения. При уменьшении толщины пластинок до 10–20 мкм для образцов с содержанием углерода > 55 % отражение остается практически стопроцентным, а вот для среднеуглеродистых шунгитов (17–55 %) отражение резко уменьшается с поглощением около половины падающего излучения. Такая критичная зависимость СВЧ-свойств шунгита от толщины пластины привлекла внимание, и в данной работе нами было проведено изучение импеданса пластин шунгитов в зависимости от толщины. Выбранный диапазон частот (0.05–15 МГц) используется как в разных геофизических приложениях, вроде скважинной радиоразведки (Dai et al., 2020), так и для шахтной радиосвязи, в частности в угольных шахтах. Образец для анализа влияния толщины пластины на импеданс и проводимость был выбран в диапазоне резкого уменьшения отражения СВЧ-излучения (17–55 %). Дополнительно изучены высокоуглеродистые образцы шунгитов (высшие антраксолиты). Целью данного сообщения является выявление связи электрофизических свойств шунгитов (как маркерных представителей природных разупорядоченных углеродистых веществ высокой степени метаморфизма) с толщиной образцов, а также с содержанием углерода и микроструктурными характеристиками для шунгитовых пород.

Материалы и методы

Пластины шунгита размером 2.5×1.5 см и толщиной 2–3 мм были вырезаны из цельных кусков породы. Они приклеивались канадским бальзамом на стандартное лабораторное стекло толщиной 2.5 мм и шлифовались до нужной толщины. Из шунгитовой породы Зажогинского месторождения были изготовлены тонкие пластины толщиной 800, 500, 300 и 100 мкм, а из высокоуглеродистых шунгитов Нигозерского и Шуньгского месторождений — ультратонкие пластинки толщиной 10–15 мкм. Ключевые характеристики образцов приведены в таблице 1.

Остатки породы, из которых были изготовлены пластины, измельчали и использовали для определения содержания углерода с помощью экспресс-анализатора AN-7529M автоматическим кулонометрическим титрованием по значению pH.

Микроструктуру изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan MIRA3. Для исследования элементного состава использовали рентгеновскую энергодисперсионную спектрометрию (ЭДС) с использованием программного обеспечения AZTEC (Oxford Instruments). Микрозонд работал при токе эмиссии 100 мкА, токе образца 100 пА, ускоряющем потенциале 20 кВ и размере пятна для элементного анализа диаметром 100 нм.

Результаты

На рис. 1 приведены частотные зависимости полного сопротивления (импеданса) *Z* образцов Зажогинского месторождения ShZ3, имеющих разную толщину. Импеданс включает в себя сумму активного (омического) сопротивления *R*, которое, как правило, не за-

Таблица 1. Образец, месторождение, толщина пластины, содержание углерода *C* и проводимость σ массивных (толщиной 5 мм) пластин

Table 1. Sample, deposit, plate thickness, carbon content C and conductivity σ of massive (5 mm thick) plates

Код образца Sample code	Месторождение Deposit	Толщина, мкм Thickness, mcm	*C*, ат. %	σ (См/м) σ (Cm/m)
ShSh1	Шуньга / Shunga	12 ± 2	95	4000–6000
ShSh2	Шуньга / Shunga	15 ± 2	73	2000–4000
ShN1	Нигозеро / Nigozero	12 ± 2	96	1500
ShZ3-8	Зажогино / Zazhogino	800 ± 10	38	1000–2000
ShZ3-5	Зажогино / Zazhogino	500 ± 10	38	– // –
ShZ3-3	Зажогино / Zazhogino	300 ± 10	38	– // –
ShZ3-1	Зажогино / Zazhogino	100 ± 5	38	– // –

Примечание. Измерение полного сопротивления осуществлялось при помощи измерителя иммитанса E7-29 по методике, изложенной в работе (Golubev et al., 2024) в диапазоне частот 0.05–15 МГц.

Note. The total resistance was measured by E7-29 immittance meter using the method described in (Golubev et al., 2024) in the frequency range of 0.05–15 MHz.

висит от частоты переменного тока, и реактивного сопротивления, которое зависит от частоты тока. Реактивное сопротивление складывается из ёмкостного, связанного с ёмкостью *C* и уменьшающегося с ростом частоты тока, и индуктивного, определяемого индуктивностью *L* и увеличивающегося с ростом частоты тока.

Эти два типа реактивного сопротивления возникают при наличии в цепи переменного тока конденсаторов (ёмкостное) и катушек индуктивности (индуктивное). Конденсатор в цепи переменного тока попеременно заряжается и разряжается, то есть обеспечивает движение заряда и протекание тока. Причем чем выше частота тока, тем быстрее происходят циклы «заряд — разряд» и тем меньше ёмкостное сопротивление. Индуктивность характеризует магнитные свойства электрической цепи, вызывающие появление магнитного поля в токопроводящем контуре и препятствующие протеканию в нем переменного тока под действием электродвижущей силы самоиндукции, что

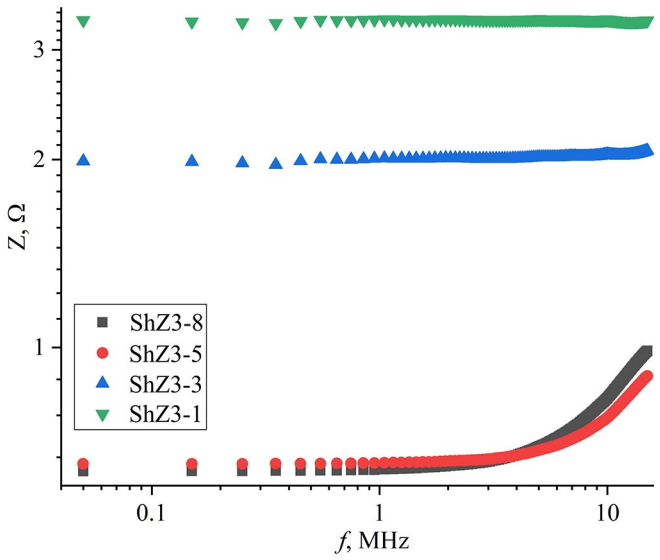

Рис. 1. Зависимость импеданса от толщины образцов шунгита ShZ3

Fig. 1. Dependence of impedance on sample thickness for ShZ3 shungites

сопровождается появлением дополнительного сопротивления (индуктивного).

Для возникновения индуктивности достаточно замкнутого либо даже разомкнутого контура из витой изолированной проволоки, причем даже одного витка для малой индуктивности. Индуктивность также может возникать в системе из параллельно расположенных проволок, расстояние между которыми больше их диаметра. В шунгитовом углероде (а в общем — в разупорядоченном углероде) роль таких проволок могут играть ленты из графеновых слоев протяженностью несколько десятков (возможно и сотен) нанометров и шириной до десяти нанометров (Golubev, Antonets, 2022; Golubev et al., 2024). Эти ленты содержат от трех до десяти искривлённых графеновых слоев и часто переплетаются между собой, а также разделяются на две или три изолированные ленты.

Результаты показывают, что при уменьшении толщины шунгитовых пластин происходит значительное увеличение импеданса. Если при толщине 500 и 800 мкм вид частотной зависимости (пологий участок в диапазоне частот 0.1–2 МГц со значительным подъемом при дальнейшем росте частоты) и значение импеданса (~ 0.7 Ом) практически одинаковы, то при уменьшении толщины пластины до 300 мкм величина импеданса на пологом участке растет в 3–4 раза, а загиб становится едва заметным и смещается в сторону больших частот (около 10 МГц по сравнению с 2–3 МГц для образцов ShZ3_5 и ShZ3_8). При толщине пластины 100 мкм величина импеданса еще больше растет (до 3.3 Ом), а зависимость становится прямолинейной во всем измеренном диапазоне частот.

Наиболее наглядно изменение типа и величины сопротивления при утонении образцов можно показать на примере высокоуглеродистых шунгитов с содержанием углерода около 95 % (рис. 2). Если частотные зависимости импеданса для макрообразцов являются характерными для индуктивного типа сопротивления, то эти же образцы в ультратонких пластинках показывают отсутствие частотной зависимости импеданса (образец ShN1) либо слабовыраженное присутствие емкостного типа сопротивления (образец ShSh1).

Активное сопротивление образцов имеет существенную зависимость от толщины пластины, что вид-

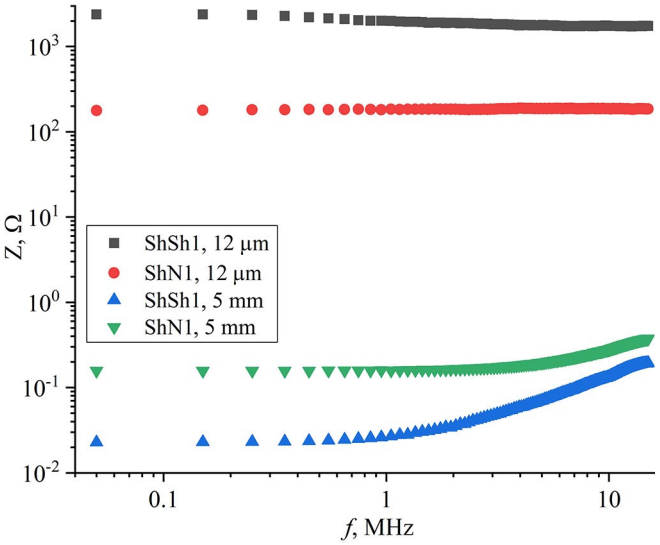

Рис. 2. Частотные зависимости импеданса образцов ShSh1 и ShN1 для ультратонких пластинок (толщиной 12 мкм) и макрообразцов (толщиной 5 мм). Для последних образцов зависимости взяты из работы (Golubev et al., 2024)

Fig. 2. Frequency dependences of the impedance of samples ShSh1 and ShN1 for ultra-thin plates (12 μm thick) and macrosamples (5 mm thick). For the latter samples, the dependences are taken from (Golubev et al., 2024)

но на рис. 3. Образцы высокоуглеродистых шунгитов, имеющие при равной толщине образца в несколько раз меньшее сопротивление, чем среднеуглеродистые шунгиты, здесь показывают в разы большее сопротивление ультратонких пластинок.

Таким образом, в тонких и ультратонких пластинах шунгита (толщиной 12–15 и 100 мкм) происходит смена типа сопротивления. Если в объемных образцах, описанных ранее в статье (Golubev et al., 2024), и исследованных в данной работе пластинах толщиной до 300 микрометров включительно присутствует индуктивный тип сопротивления, то ультратонкие пластинки шунгита показывают присутствие только активного сопротивления в измеренном диапазоне частот (кроме одного образца (ShSh2) с ёмкостным типом сопротивления и с аналогичным слабовыраженным для образца ShSh1).

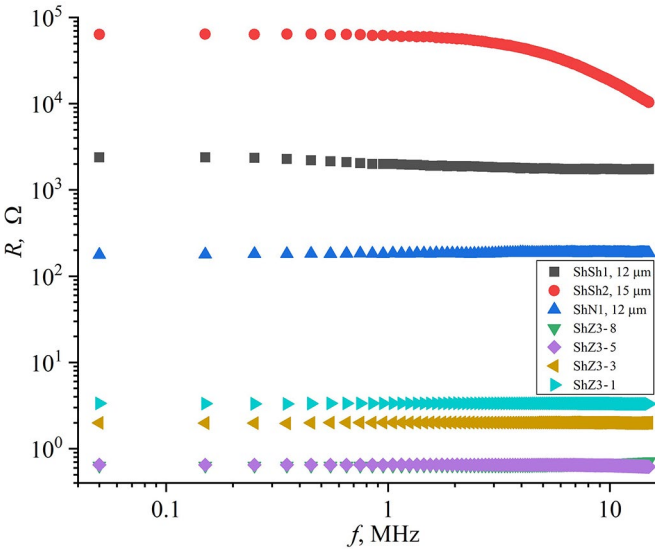

Рис. 3. Зависимость активного сопротивления образцов шунгитов разной толщины от частоты

Fig. 3. Dependence of active resistance of shungite samples of different thickness on the frequency

Обсуждение

Проведенные измерения показывают влияние толщины пластины на две электрофизические характеристики шунгитов. Во-первых, происходит рост сопротивления при уменьшении толщины образца. Начиная с толщины 300 мкм и менее этот рост становится значительным, увеличивая сопротивление на несколько порядков. Во-вторых, происходит смена типа сопротивления. Если для макрообразцов шунгитов характерным является индуктивный тип сопротивления, то при уменьшении толщины пластины шунгита до 100 мкм реактивная составляющая импеданса исчезает и остается только активное сопротивление. Причем небольшой отрицательный наклон частотной зависимости импеданса для ультратонких образцов ShSh1 и ShSh2 свидетельствует о переходе к емкостному типу сопротивления.

Особенности проводимости природного разупорядоченного углерода определяются его многоуровневой структурой. На молекулярном уровне это графеновые слои, частично изогнутые и содержащие дефекты, на надмолекулярном уровне это наноразмерные пачки плоских либо изогнутых графеновых слоев, многослойные протяженные ленты и глобулы, образующие более крупные агрегаты (блоки, цепочки), достигающие микрометровых размеров (Golubev et al., 2024). Дополнительно на электропроводность влияет микропористость.

На молекулярном уровне в разупорядоченном углероде ключевое значение играет его собственная электронная проводимость, обусловленная большим количеством графенсодержащих структур. Процедура приготовления шунгитовых пластинок не сопровождается термическим либо барическим воздействием, достаточным для изменения молекулярной структуры шунгитового углерода, поэтому возможное влияние модификации молекулярной структуры на изменение электрофизических свойств при утонении образцов можно исключить. Также можно исключить и возможность изменения надмолекулярной структуры в нашем эксперименте ввиду отсутствия признаков существенного (выше 60 °C) нагрева приготовляемых образцов.

Значительный рост сопротивления среднеуглеродистых (38 %) пластинок шунгита наиболее вероятно связан с их микроструктурными особенностями. Эти шунгиты представляют собой углерод-минеральные композиты, в которых в матрице из разупорядоченного углерода размещаются микрокристаллы минералов, преимущественно кварца, пирита и алюмосиликатов (рис. 4), со средними размерами от 7 до 12 мкм (Golubev et al., 2019). По отношению к углероду они являются диэлектриками, так как их проводимость на порядки ниже, чем у шунгитового углерода. Разброс размеров у микрокристаллов большой, а концентрация при $C < 73$ % достаточно высока. В случае ультратонких пластинок (10–15 мкм толщиной) такие микрокристаллы могут перекрывать и всю толщину пластинки, что, учитывая их высокую концентрацию, существенно ограничивает число токопроводящих путей

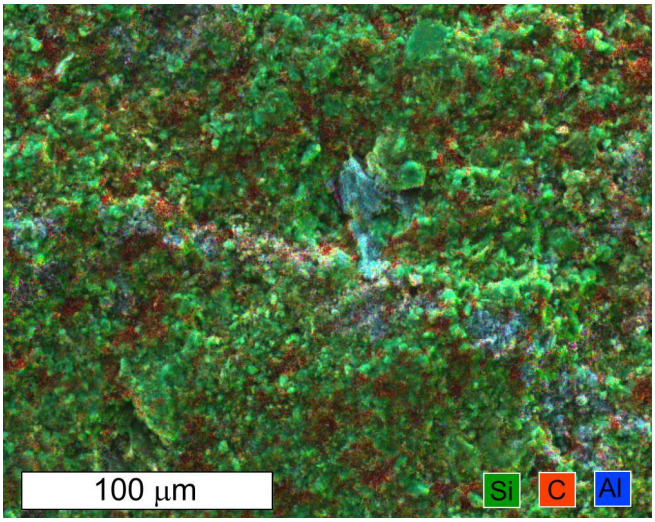

Рис. 4. Типичный пример распределения в углеродной (красный цвет) матрице шунгита ShZ3 микрокристаллов кварца (зеленый цвет) и алюмосиликатов (синий цвет). Выборочный элементный контраст изображения сканирующей электронной микроскопии

Fig. 4. A typical example of the distribution of quartz microcrystals (green) and aluminosilicates (blue) in the carbon (red) matrix of ShZ3 shungite. Selective elemental contrast of the scanning electron microscopy image

в сравнении с макрообразцами и с пластинами толщиной сотни микрометров.

Рост сопротивления у высокоуглеродистых образцов может быть связан с надмолекулярной структурой углерода. В отличие от графита, имеющего слоистую анизотропную структуру, шунгитовый углерод имеет изотропную структуру, в которой распространение тока происходит сложными путями в силу хаотичного распределения наиболее связных, протяженных и, соответственно, наиболее выгодных для протекания тока структурных элементов. Произведенное при утонении критичное уменьшение толщины образца может обрезать значительную часть этих путей, что и снижает проводимость.

Потеря реактивного (индуктивного) сопротивления, вероятнее всего, связана с общим ростом активного сопротивления, при котором вклад индуктивного (реактивного) сопротивления в импеданс теряется на фоне возросшего активного сопротивления. Смена типа сопротивления на емкостное, так же, как и рост общего сопротивления, скорее всего, связана с обрезанием многих путей распространения тока при утонении шунгитовой пластинки, что делает преобладающим протекание тока через менее протяженные (пачечные) структуры, которые в совокупности с порами и примесями некоторых элементов (Si, N, S) в молекулярной форме могут формировать микроконденсаторы (Golubev et al., 2024).

В геологической среде проводящий графитоподобный углерод разной степени упорядоченности (от хорошо кристаллизованного графита до стеклоподобного углерода) слагает как крупные по мощности, иногда достигающие нескольких метров слои и линзы в горных породах, так и достаточно протяженные, но при этом тонкие мили- и микроразмерные жилки. Такие образования могут быть широко развиты в довольно больших по объему геологических телах, насыщая их и оказывая существенное влияние на их электрофизические свойства. Результат данного исследования показывает, что важной характеристикой породы является не только концентрация углерода, но и форма его присутствия. Изученные в работе образцы в виде пластин из шунгита могут быть сопоставлены с шунгитовыми и антраксолитовыми жилками и линзами, а обнаруженная в данной работе зависимость величины и типа сопротивления пластин из шунгита от толщины показывает возможность учета таких особенностей для понимания и коррекции данных электроразведки при изучении содержащих подобные образования горных пород в зависимости от их дисперсности и мощности, а также для оценки возможностей шахтной радиосвязи.

Для решения технических задач материаловедения, связанных прежде всего с потребностями электроники, связи, контроля состояния строительной инфраструктуры, а также с проблемами экстенсивного роста электромагнитного загрязнения, нарушающего работу окружающего электрооборудования и наносящего ущерб человеку, животным и растениям, используются материалы из разупорядоченного углерода шунгитов. Они имеют те же уникальные особенности, что и широко используемые полимерные композиты, содержащие наполнители на основе углерода (например, графита, нановолокон и нанотрубок), — это сочетание электропроводности, полимерной гибкости и малого веса (Golubev et al., 2019; Antonets et al., 2021). Технологические приложения таких материалов относятся прежде всего к электронике (например, возможность изготовления гибких и легких малоразмерных материалов для экранирования в малогабаритных устройствах), связи (для уменьшения веса и габаритов, например, волноводных элементов в антенных СВЧ-устройствах) и строительной инфраструктуре (самоопределение деформации/повреждения строений и фундаментов). Значительное изменение электрофизических свойств при утонении до десятков микрометров открывает новые перспективы для разработки функциональных материалов на основе природного и синтетического разупорядоченного углерода.

Заключение

Изучение зависимости электрофизических свойств шунгитов с разным содержанием углерода (38, 73, 95 и 96 %) от толщины образца показало, что уменьшение толщины до первых сотен микрометров вызывает существенный (до двух порядков) рост активного сопротивления в образцах. В имеющих индуктивный тип сопротивления шунгитах после утонения образца до 100 микрометров реактивное сопротивление перестает вносить вклад в полное сопротивление (импеданс), а для некоторых высокоуглеродистых образцов при толщине 10–15 микрометров происходит переход к ёмкостному типу сопротивления. Такое изменение электрофизических свойств при утонении имеет как материаловедческое значение для технологий разработки новых функциональных материалов на основе разупорядоченного углерода для нужд электроники, связи и строительства, так и геофизическое при интерпретации данных электроразведки углеродсодержащих горных пород.

Работа подготовлена в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» от 17.01.2024 № 075-03-2024-162 по теме «Влияние структуры на статические и динамические электропроводящие свойства разупорядоченного углерода». В работе использовано оборудование ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Литература / References

Голубев Е. А., Антонец И. В. Влияние некоторых минералого-петрографических особенностей на отражение шунгитовыми породами СВЧ-излучения в диапазоне 26–39 ГГц // Вестник геонаук. 2017. № 5. С. 43–48.
Golubev Ye. A., Antonets I. V. Influence of some mineralogical and petrographic features on the reflection of microwave radiation in the range of 26–39 GHz by shungite rocks. Vestnik of Geosciences, 2017, No. 5, pp. 43–48.

Гречухин В. В. Изучение угленосных формаций электрическими методами. М.: Недра, 1980. 360 с.
Grechukhin V. V. Study of coal-bearing formations by electrical methods. Moscow: Nedra, 1980, 360 p. (in Russian)

Ерофеев Л. Я. Электрические свойства минералов и горных пород. Томск: Изд-во ТПУ, 1994. 54 с.
Erofeev L. Ya. Electrical properties of minerals and rocks. Tomsk: TPU Publishing House, 1994, 54 p. (in Russian)

Зайцев Г. Н., Ковалевский В. В. Влияние структуры и влажности шунгитовых пород на их электрические свойства // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. Вып. 9. 135–139.
Zaitsev G. N., Kovalevsky V. V. Influence of structure and humidity of shungite rocks on their electrical properties. Geology and mineral resources of Karelia. No. 9, Petrozavodsk: Karelian RC of RAS, 2006, pp. 135–139. (in Russian)

Морозов С. В., Новоселов К. С., Гейм А. К. Электронный транспорт в графене. УФН // 2008. № 178. С. 776–780.
Morozov S. V., Novoselov K. S., Geim A. K. Electron transport in graphene. Usp. Fiz. Nauk, 2008, V. 178, pp. 776–780. (in Russian)

Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 164 с.
Parkhomenko E. I. Electrical properties of rocks. Moscow: Nauka, 1965, 164 p. (in Russian)

Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. М.: Недра, 1968. 380 с.
Semenov A. S. Electrical exploration by the method of natural electric field. Moscow: Nedra, 1968, 380 p. (in Russian)

Филиппов М. М. Антраксолиты. СПб.: ВНИГРИ, 2013. 296 с.
Filippov M. M. Anthraxolites, VNIGRI: Saint Petersburg, Russia, 2013. (in Russian).

Якубовский Ю. В. Электроразведка: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. М., 1980. 384 с.
Yakubovsky Yu. V. Electrical prospecting: Textbook for universities. 2nd ed., revised. Moscow, 1980, 384 p. (in Russian)

Antonets I. V., Golubev Ye. A., Shcheglov V. I., Shiyong Sun Electromagnetic shielding effectiveness of lightweight and flexible ultrathin shungite plates. Current Applied Physics. 2021. Vol. 29. pp. 97–106.

Berezkin V. I., Kholodkevich S. V., Konstantinov P. P. Hall effect in the natural glassy carbon of shungites. Phys. Solid State. 1997. Vol. 39. pp. 1590–1593.

Chou N. H., Pierce N., Lei Y., Perea-L´opez N., Fujisawa K., Subramanian S., Robinson J. A., Chen G., Omichi K., Rozhkov S. S., Rozhkova N. N., Terrones M., Harutyunyan A. R. Carbon-rich shungite as a natural resource for efficient Li-ion battery electrodes. Carbon. 2018. Vol. 130. pp. 105–111.

Chung D. D. L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. Carbon. 2001. Vol. 39. pp. 279–285.

Chung D. D. L. Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing. Carbon. 2012. Vol. 50. pp. 3342–3353.

Dai L.; Hu H.; Jiang J.; Sun W.; Li H.; Wang M.; Vallianatos F.; Saltas V. An Overview of the Experimental Studies on the Electrical Conductivity of Major Minerals in the Upper Mantle and Transition Zone. Materials. 2020. Vol. 13. Pp. 408.

Golubev E. A. Electrophysical properties and structural features of shungite (natural nanostructured carbon). Phys. Solid State. 2013. Vol. 55. pp. 1078–1086.

Golubev Ye. A., Antonets I. V. Electrophysical Properties and Structure of Natural Disordered sp^2 Carbon. Nanomaterials. 2022. Vol. 12. No. 21. pp. 3797.

Golubev Ye. A., Antonets I. V., Shcheglov V. I. Static and dynamic conductivity of nanostructured carbonaceous shungite geomaterials. Materials Chemistry and Physics. 2019. Vol. 226. pp. 195–203.

Golubev Ye. A., Antonets I. V., Korolev R. I., Prikhodko A. S., Borgardt N. I., Shiyong Sun. Characterization of nanostructure of naturally occurring disordered sp^2 carbon by impedance spectroscopy. Materials Chemistry and Physics. 2024. Vol. 317. pp. 129–181.

Gupta S., Tai N.-H. Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band. Carbon. 2019. Vol. 152. pp. 159–187,

Emelyanov S., Kuzmenko A., Rodionov V., Dobromyslov M. Mechanisms of Microwave Absorption in carbon compounds from shungite. J. Nano Electron. Phys. 2013. Vol. 5, pp. 04023 (3pp).

Kovalevski V. V. In: S. V. Krivovichev (eds), Minerals as Advanced Materials I. Springer, Berlin, Heidelberg. 2008.

Kovalevski V. V., Prikhodko A. V., Buseck P. R. Diamagnetism of natural fullerenelike carbon. Carbon. 2005. Vol. 43. pp. 401–405.

Kulikov V. A., Yakovlev A. G., Polikarpova V. A. Some problems of electrical geophysical prospecting methods used for exploration of ore deposits. Geodynamics & Tectonophysics. 2021. Vol. 12 (3). pp. 731–747.

Lyn'kov L. M., Borbot'ko T. V., Krishtopova E. A. Radio-absorbing properties of nickel-containing shungite powder. Tech. Phys. Lett. 2009. Vol. 35. pp. 410–411.

Moshnikov I. A., Kovalevski V. V. Electrophysical properties of shungites at low temperatures. Nanosyst. Phys. Chem. Math. 2016. Vol. 1. pp. 214–219.

Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. Science. 2004. Vol. 306. No. 5696. pp. 666–669.

Thomassin J. M., Jerome C., Pardoen T., Bailly C., Huynen I., Detrembleur C. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials. Mater. Sci. Eng. R. 2013. Vol. 74. pp. 211–232.

Vieira L. S. A review on the use of glassy carbon in advanced technological applications. Carbon. 2022. Vol. 186, pp. 282–302.

Поступила в редакцию / Received 20.08.2024

300 лет Российской академии наук
300 years of Russian Academy of Sciences

Роль Комиссии по технологической минералогии РМО в повышении полноты и комплексности использования минерального сырья

The role of the RMS Technological Mineralogy Commission in improving the completeness and integrity of mineral raw utilization

On April 12, 2024, the 16th Russian Seminar on Technological Mineralogy with a thematic program was held at the Institute of Geology, Komi SC UB RAS. A plenary report «Role of the RMS Technological Mineralogy Commission in improving the completeness and integrity of mineral raw material utilization» was presented. V. V. Shchiptsov with co-authors O. B. Kotova and E. G. Ozhogina presented their analysis of the scientific, organizational and practical activities of the Technological Mineralogy Commission of the Russian Mineralogical Society from the moment of its creation by the decision of the 6th All-Union Congress of the Mineralogical Society in December 1982 to the present day. The role of the Commission in conducting geological, mineralogical and technological research related to the technological assessment of mineral raw materials and the promotion of technological mineralogy as an important independent scientific direction of the Earth Sciences at various scientific sites and publications is shown.

Введение

Понятие «технологическая и экономическая минералогия» впервые было введено академиком В. М. Севергиным в 1798 г. в книге «Первые основания минералогии или естественной истории ископаемых тел».

Вовлечение в сферу практического интереса использования какого-либо минерала или отыскание новых областей применения минералов, уже используемых в народном хозяйстве, зачастую сравнимо по своему технико-экономическому эффекту с открытием и освоением нового месторождения. Как подчеркивал А. И. Гинзбург (Гинзбург, 1954), не существует минералов, не имеющих практического значения, мы просто не умеем еще их использовать. В 1980-е годы трудами отечественных геологов и технологов была сформирована самостоятельная научная дисциплина «технологическая минералогия» и определены ее основные направления (Гинзбург и др., 1981; Пирогов, 1982; Ревнивцев, 1982).

Комиссия по технологической минералогии

С целью объединения усилий ученых и производственников по проблемам технологической минералогии на VI съезде Всесоюзного минералогического общества в декабре 1982 г. было принято решение о создании Комиссии по технологической минералогии. Это было обусловлено необходимостью обсуждения актуальных вопросов повышения эффективности, полноты, степени комплексности, рациональности использования сырья и прироста разведанных запасов на основе глубокого и целенаправленного изучения минерального состава руд. В. И. Ревнивцев руководил комиссией в течение 1983–1989 гг.

Вот имена тех, кто стоял у истоков Комиссии по технологической минералогии Минералогического общества: В. И. Ревнивцев, председатель комиссии, член-корр. АН СССР, докт. техн. наук, профессор, директор института «Механобр»; В. М. Изоитко, ученый секретарь комиссии, докт. геол.-мин. наук, профессор, главный научный сотрудник «Механобр Инжиниринг»; члены бюро — А. И. Гинзбург, докт. геол.-мин. наук, профессор, зав. отделом редких металлов «ВИМС»; Д. П. Григорьев, докт. геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой минереалогии Ленинградского горного института; О. И. Иванов, докт. геол.-мин. наук, профессор, директор ЦНИИОлово; Б. И. Пирогов, докт. геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой минералогии Криворожского геолого-разведочного института.

Технологическая минералогия формируется как самостоятельное научное направление в науках о Земле, изучающее минералы в виде объектов переработки с помощью различных технологий и объединяющее все виды минералогических исследований с изучением технологических свойств минералов и руд.

После безвременно ушедшего из жизни В. И. Ревнивцева миссия председателя комиссии была возложена на В. М. Изоитко. На VIII съезде РМО (1992 г.) В. М. Изоитко выступила с пленарным докладом на тему «Проблемы и достижения технологической минералогии», в котором было освещено применение достижений и методов технологической минералогии для решения задач полноты и комплексности использова-

ния добываемого минерального сырья и утилизации отходов. В 1997 году вышла монография В. М. Изоитко по технологической минералогии (Изоитко, 1997).

Основные результаты деятельности комиссии за период с 2005 г. по настоящее время

В Петрозаводске в Институте геологии КарНЦ РАН с 2005 года квартируется Комиссия по технологической минералогии РМО. Благодаря усилиям комиссии организовываются и проводятся в разных городах страны российские семинары по технологической минералогии. Такие мероприятия уже состоялись на базе Белгородского государственного технологического университета и Лебединского горно-обогатительного комбината, Института земной коры Сибирского отделения РАН и компании ООО НПК «Спирит» в Иркутске, ВНИИгеолнеруд в Казани, Магнитогорского государственного технического университета и Магнитогорского металлургического комбината, Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья в Москве, Института геологии Карельского научного центра РАН и Петрозаводского государственного университета, Санкт-Петербургского горного университета и НПК «Механобр-Техника», Института геологии Коми НЦ УрО РАН в Сыктывкаре. Издаются научные сборники по технологической минералогии, охватывающие целый ряд актуальных вопросов — от результатов фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геолого-разведочных работ до оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения с получением конечных продуктов передела минерального сырья (таблица 1).

Наиболее актуальные статьи приводятся на примерах из выпусков разных лет о методологии технологической минералогии и природе технологических свойств минералов, о поведении минералов в единой геолого-техногенной системе и современных проблемах технологической минералогии (Пирогов, 2006; Пирогов, 2012; Ожогина и др., 2016), о роли технологической минералогии в решении проблем комплексного освоения полезных ископаемых, о комплексной переработке неметаллических полезных ископаемых как основы инновационных проектов и инновационном потенциале техногенных ресурсов России в их изучении и оценке перспектив комплексного промышленного использования (Ожогина, Рогожин, 2006; Лыгина, 2007; Котова, 2013; Мелентьев, 2015), о новых технологических решениях в области переработки и использования минерального сырья на основе изменения структуры и свойств минералов (Котова, 2008; Юсупов, 2010), о современных исследованиях технологической минералогии в высоких технологиях XXI века (Щипцов, 2013), о срастаниях минералов и структурном анализе руд в технологической минералогии (Пирогов, 2014), о техногенных отходах как новых источниках сырья цветных, благородных, редких и токсичных металлов Алмалыкского горно-металлургического комбината (Туресебеков и др., 2019) и т. д.

Технологическая минералогия с момента своего возникновения стала активно завоевывать научные площадки, вовлекая для своих целей новые области знаний. Члены комиссии активно участвуют в ежегодных научных мероприятиях, таких как Годичные собрания РМО и Ферсмановские чтения. Как правило, в программу этих научных мероприятий включены секции по технологической минералогии. С 1977 года ежегодно проводятся конференции «Плаксинские чтения». Уже более двух десятилетий в сборниках материалов конференции существует рубрика «Технологическая минералогия». В трудах юбилейной конференции «Плаксинские чтения — 2000», посвященной 100-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР И. Н. Плаксина, первый раздел именован «Технологическая минералогия». С пленарным докладом выступил Ю. С. Кушпаренко (ВИМС) (Кушпаренко, 2000). В журнале «Обогащение руд» существует постоянная рубрика «Технологическая минералогия» при активном участии членов бюро комиссии в составе как редсовета журнала, так и как авторов публикаций.

В Москве, в ВИМСе, 15–16 мая 2018 г. состоялась Российская конференция с международным участием «Роль технологической минералогии в рациональном недропользовании». В числе организаторов конференции выступили Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра), ФГБУ «ВИМС», Российское минералогическое общество (РМО), Комиссия по технологической минералогии РМО. В научную программу совещания вошли вопросы по основным проблемам освоения и развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации и минералого-технологическим оценкам минерального сырья. В рамках совещания работали демонстрационные стенды ООО «Мелитек», «Люкон-Про», «Системы для микроскопии и анализа», «СИАМС», «Анакон» и Malvern Panalitical. Доклады совещания опубликованы в сборнике материалов (Роль…, 2018), а также в нескольких номерах журнала «Разведка и охрана недр» за 2018 и 2019 годы.

В 2011–2020 гг. в ФГБУ «ВИМС» ежегодно проходила минералогическая школа (семинар) «Актуальные проблемы и современные методы прикладной мине-

Таблица 1. Данные по публикациям в трудах Комиссии по технологической минералогии за период 2006–2023 гг.

Table 1. Data on publications in the proceedings of the Technological Mineralogy commission for 2006–2023

Годы публикаций Years of publication	2006–2009	2010–2012	2013–2015	2016–2018	2019–2022, 2023	За весь период Total
Кол-во статей Number of articles	79	84	67	57	47	334
Кол-во авторов Number of authors	35–43–58 146	63–75–50 188	37–53 55 145	52–51–37 146	43–51–45 139	764

Фото 1. Минералогическая школа. ВИМС, Москва. 2016 г.

Photo 1. Mineralogical school. VIMS, Moscow. 2016

Фото 2. Минералогическая школа. Практическое занятие по оптико-минералогическому анализу. Преподаватель И. В. Голиусова. 2017 г.

Photo 2. Mineralogical school. Practical class on the optical-mineralogical analysis. Lecturer I. V. Goliusova. 2017

Фото 3. Минералогическая школа. Вручение свидетельства Т. А. Чикишевой. 2018 г.

Photo 3. Mineralogical school. Presentation of the certificate to T. A. Chikisheva. 2018

ралогии», в рамках которой рассматривались роль и значение минералогических исследований твердых полезных ископаемых при геолого-разведочных работах, включая освоение сырьевых объектов и ликвидацию экологических последствий (фото 1). Для слушателей школы были организованы практические занятия по наиболее востребованным методам минералогического анализа (оптико-минералогическому, оптико-геометрическому, рентгенографическому фазовому) (фото 2). Ориентируясь на современное состояние лабораторных работ, были проведены специальные лекции по метрологическому и методическому сопровождению минералогических исследований.

За десять лет слушателями школы были российские специалисты практически со всех уголков страны и наши коллеги из Казахстана, Узбекистана и Алжира. Около 200 человек (геологи, минералоги, технологи, химики, физики, метрологи, экологи и др.) — представители организаций разной ведомственной принадлежности — получили не только свидетельства об окончании школы, но и полезные навыки и связи, которые пригодятся на протяжении всей профессиональной жизни (фото 3).

Международная активность

Члены Комиссии по технологической минералогии принимают активное участие в международной деятельности по различным направлениям наук о Земле. Российское минералогическое общество (РМО), включая Комиссию по технологической минералогии, является неотъемлемой частью Международной минералогической ассоциации (IMA)[1]. Согласно решению бюро Совета Международной комиссии по прикладной минералогии (ICAM) Международной минерало-

[1]Международная минералогическая ассоциация (IMA) координирует научные исследования, публикует научные результаты и организует международные конференции и семинары в рамках специализированных комиссий по различным аспектам минералогии, включая Комиссию по прикладной минералогии (CAM). Член бюро Комиссии по технологической минералогии д. г.-м. н. О. Б. Котова является официальным представителем от РМО в IMA/CAM.

Фото 4. Заседание Совета ICAM. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. О. Б. Котова, вице-президент (2015–2019), Россия; Мартин Брокман, и. о. президента как представитель IMA/CAM, Норвегия; Дитер Рамльмайер, секретарь IMA/CAM, Германия

Photo 4. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. ICAM Council meeting. Olga Kotova, Vice President (2015–2019), Russia; Maarten Broekmans, Acting President as IMA/CAM Representative, Norway; Dieter Rammlmair, IMA/CAM Secretary, Germany

гической ассоциации (IMA), принятому в ноябре 2015 года, наша страна впервые была избрана местом проведения XIV Международного конгресса по прикладной минералогии — весьма престижного научного мероприятия мирового уровня. 23–27 сентября 2019 года в Белгородском государственном технологическом университете им. В. Г. Шухова успешно прошел 14-й Международный конгресс по прикладной минералогии под девизом **«Прикладная минералогия: будущее рождается сегодня» (фото 4).** Материалы конгресса изданы в издательстве «Шпрингер» (серия Proceedings in Earth and Environmental Sciences) (14th International..., 2019).

Организаторами конгресса выступили: Международная минералогическая ассоциация (IMA), Российское минералогическое общество (РМО), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Российская академия наук (РАН), правительство Белгородской области, Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН), Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова, Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), научно-производственная корпорация «Механобр-техника». Подробнее о конгрессе можно прочитать на сайте www.geo.komisc.ru/icam2019 (ICAM-2019).

В ходе 14-го Международного конгресса по прикладной минералогии по решению Международного совета конгресса Шиёнг Сан, профессор Юго-Западного университета науки и технологий (SWUST), имея полномочия Китайского минералогического общества, получил право на проведение конгресса (ICAM-2023). Почти четыре года оргкомитет (председатель — профессор SWUST Фауин Донг) и научный комитет конгресса (включая академика А. М. Асхабова, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) преодолевали последствия пандемии, но при поддержке Международного совета конгресса (президент ICAM Council д-р О. Б. Котова, 2019–2023) и Международной минералогической ассоциации (представитель dr. Мартин Брокманс, IMA/CAM), Юго-Западного университета науки и технологий, Национального фонда естественных наук и других организаций Китая, а также дружественных университетов, научно-исследовательских институтов и организаций России и других стран 15-й Международный конгресс по прикладной минералогии удалось провести 20–23 августа 2023 г. (фото 6). Известные эксперты и ученые из Китая, России, Франции, Испании, Японии, Австралии и других стран собрались в новом районе Тяньфу города Чэнду (провинция Сычуань, Китай), чтобы обсудить результаты последних исследований и тенденции развития минералогических и смежных наук, а также для международного академического и вузовского обмена и сотрудничества (http://icam2023.swust.edu.cn).

Длительный период члены Комиссии по технологической минералогии участвовали в разработке многостороннего проекта FODD (База данных месторождений Фенноскандии и металлогеническая карта, критические металлы и индустриальные минералы Фенноскандии XXI века). В этом проекте были задействованы представители Норвегии, Северо-Запада

Фото 5. Председатель Комиссии по технологической минералогии РМО В. В. Щипцов и представитель IMA/CAM Dr. Мартин Брокманс во время посещения Лебединского ГОКа

Photo 5. Chairman of the RMS Technological Mineralogy Commission V. V. Shchiptsov and IMA/CAM Representative Dr. Maarten Broekmans during their visit to Lebedinsky MPP

Фото 6. Открытие 15-го Международного конгресса по прикладной минералогии. Чэнду, Китай. 21 августа 2023 г.

Photo 6. Opening of the 15th International Congress on Applied Mineralogy. Chengdu, China. August 21, 2023

России, Финляндии, Швеции и Эстонии. Основные результаты представлены в обобщающих работах (Gautneb et al., 2013; Ahtola et al., 2015).

В заключение отметим, что Комиссия по технологической минералогии — одна из активных комиссий РМО — объединяет членов отделений от восточных до западных границ РФ, выступая часто на международных научных площадках для координации целей и задач, объединения научного и кадрового потенциала в повышении комплексности использования минерального сырья при добыче и переработке, поиска новых решений, разработки новых технологических подходов, определяя путь развития минерально-сырьевой базы и экономики страны.

Активная деятельность комиссии на протяжении сорокалетнего периода осуществлялась благодаря существенному вкладу специалистов научно-исследовательских организаций, университетов и производственных компаний страны, имена которых, помимо упомянутых выше создателей комиссии, стоит перечислить: Л. А. Азарнова, С. И. Ануфриева, Ю. М. Астахова, А. М. Асхабов, И. А. Богуш, Н. М. Боева, Т. П. Бубнова, С. Т. Буртан, И. Н. Бурцев, И. Г. Быстров, Л. А. Вайсберг, И. В. Викентьев, Ю. Л. Войтеховский, Р. В. Газиулин, Л. Г. Герасимова, Е. А. Горбатова, Е. В. Горбунова, А. М. Губайдуллина, Л. А. Данилевская, Л. М. Делицын, Д. А. Додин, В. Т. Дубинчук, О. Б. Дудкин, Ю. В. Ерохин, И. В. Жерновский, В. Е. Жукова, Н. Н. Зинчук, Т. К. Иванова, Г. Ю. Иванюк, В. Г. Изотов, В. П. Ильина, А. В. Иоспа, В. И. Кевлич, Е. В. Кислов, А. П. Козлов, Р. И. Конеев, А. В. Корнилов, О. Б. Котова, О. С. Кочетков, И. П. Кременецкая, Г. И. Крылова, В. И. Кузьмин, И. В. Кунилова, Ю. С. Кушпаренко, А. А. Лавриненко, Г. А. Лебедева, Е. Н. Левченко, Е. Г. Лихникевич, В. П. Лузин, Т. З. Лыгина, Д. В. Макаров, Г. Б. Мелентьев, С. К. Мустафин, Л. Ф. Наркелюн, В. В. Наседкин, Ю. Н. Нерадовский, К. А. Никифоров, А. Г. Никифоров, А. И. Николаев, Е. Н. Ожогина, Б. А. Остащенко, Г. П. Озерова, С. В. Петров, Е. Н. Пермяков, Ю. С. Полеховский, А. В. Понарядов, С. С. Потапов, С. А. Прокопьев, Е. С. Прокопьев, Л. Т. Раков, А. А. Рогожин, Н. С. Рудашевский, Н. Е. Савва, Е. Н. Светова, В. Ю. Селезнева, Г. А. Сидоренко, Л. С. Скамницкая, А. Ф. Сметанников, З. В. Специус, В. В. Строкова, Н. А. Сычева, Ф. А. Трофимова, А. В. Турашева, А. Х. Туресебеков, И. Д. Устинов, П. В. Фролов, А. Н. Хатькова, П. Ю. Ходанович, И. В. Холошин, В. А. Чантурия, Е. Л. Чантурия, А. Н. Чертов, Т. А. Чикишева, Х. Т. Шарипов, Ю. А. Шатнов, Б. М. Шмакин, Д. А. Шушков, Н. Н. Щербакова, В. В. Щипцов, Т. С. Юсупов, О. А. Якушина, Л. К. Яхонтова и другие.

Председатель Комиссии по технологической минералогии РМО В. В. Щипцов, Петрозаводский госуниверситет, Петрозаводск, *vv.shchiptsov@gmail.com*

член бюро Комиссии О. Б. Котова, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН им. Н. П. Юшкина, Сыктывкар, *kotova@geo.komisc.ru*

член бюро Комиссии Е. Г. Ожогина, ФГБУ «ВИМС им. Н. М. Федоровского», Москва, *vims-ozhogina@mail.ru*

Литература / References

Гинзбург А. И. О минералах — геохимических индикаторах и их значении при поисках руд редких металлов в пегматитах // ДАН СССР. 1954. Т. 98. № 2. С. 233–235

Ginzburg A. I. About minerals — geochemical indicators and their significance in the search for rare metal ores in pegmatites. Doklady Earth Sciences USSR, Vol. 98, No. 2, 1954, pp. 233–235. (in Russian)

Гинзбург А. И., Кузьмин В. И., Сидоренко Г. А. Минералогические исследования в практике геолого-разведочных работ. М.: Недра, 1981. 237 с.

Ginzburg A. I., Kuzmin V. I., Sidorenko G. A. Mineralogical studies in the practice of geological exploration. Moscow: Nedra, 1981, 237 p. (in Russian)

Изоитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 532 с.

Izoitko V. M. Technological mineralogy and ore assessment. St. Petersburg: Nauka, 1997, 532 p. (in Russian)

Котова О. Б. Технологическая наноминералогия и проблемы комплексного освоения минерального сырья // Белая книга по нанотехнологиям: Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокомпозитов в Российской Федерации. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С. 300–301.

Kotova O. B. Technological nanomineralogy and problems of integrated development of mineral raw materials. White paper on nanotechnology: Research in the field of nanoparticles, nanostructures and nanocomposites in the Russian Federation. Moscow: LKI Publishing House, 2008, pp. 300–301. (in Russian)

Котова О. Б. Физика поверхности минералов как метод прогнозной оценки их технологических свойств // Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии: Сб. науч. ст. / Под ред. В. В. Щипцова. М.: ВИМС, 2013.

Kotova O. B. Surface physics of minerals as a method for predictive assessment of their technological properties. Predictive assessment of technological properties of minerals by methods of applied mineralogy. Collection of scientific articles Ed. by D. Sc. (Geology and Mineralogy) V. V. Shchiptsov. Moscow: VIMS, 2013. (in Russian)

Кушнаренку Ю. С. Технологическая минералогия — основной метод технологической оценки потенциальных полезных ископаемых на ранних стадиях геологического изучения недр // Развитие идей И. Н. Плаксина в области обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии (Плаксинские чтения–2000) / Отв. ред. В. А. Чантурия. М.; 2000. С. 8–9.

Kushparenko Yu. S. Technological mineralogy — main method of technological evaluation of potential minerals at the early stages of geological study of subsurface. Development of I. N. Plaksin's ideas in the field of mineral processing and hydrometallurgy (Plaksin Readings –2000). Ed. V. A. Chanturiya. Moscow: 2000, pp. 8–9. (in Russian)

Лыгина Т. З. Комплексная переработка неметаллических полезных ископаемых как основа инновационных проектов // Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 28–34.

Lygina, T. Z. Complex processing of non-metallic minerals as a basis for innovation projects (in Russian). Significance of technological mineralogy research in solving the problems of complex development of mineral raw materials. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2007, pp. 28–34. (in Russian)

Мелентьев Г. Б. Инновационный потенциал техногенных ресурсов России и роль технологической геохимии в их изучении и оценке перспектив комплексного промышленного использования // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 8–30.
Melentyev G. B. Innovative potential of technogenic resources of Russia and the role of technological geochemistry in their study and assessment of prospects for integrated industrial use. Technological mineralogy of natural and technogenic deposits. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2015, pp. 8–30. (in Russian)

Ожогина Е. Г., Рогожин А. А. Технологическая минералогия в решении проблем комплексного освоения полезных ископаемых // Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геолого-разведочных работ. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 17–21.
Ozhogina E. G., Rogozhin A. A. Technological mineralogy in solving the problems of integrated development of minerals. Results of fundamental and applied research on the development of methods of technological evaluation of metal ores and industrial minerals at early stages of geological exploration. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2006, pp. 17-21. (in Russian)

Ожогина Е. Г., Пирогов Б. И., Рогожин А. А. Современные проблемы технологической минералогии // Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов передела минерального сырья. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2016. С. 10–13.
Ozhogina E. G., Pirogov B. I., Rogozhin A. A. Modern problems of technological mineralogy. Role of technological mineralogy in obtaining end products of mineral raw materials processing. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2016, pp. 10–13. (in Russian)

Пирогов Б. И. Роль минералогических исследований в обогащении руд // Минералогический журнал. 1982. № 1. С. 81–92.
Pirogov B. I. The role of mineralogical research in ore dressing. Mineralogical Journal, 1982, No. 1, pp. 81–92. (in Russian)

Пирогов Б. И. Методология технологической минералогии и природа технологических свойств минералов // Результаты фундаментальных м прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геолого-разведочных работ. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 7–17.
Pirogov B. I. Methodology of Technological Mineralogy and Nature of Technological Properties of Minerals. Results of Fundamental and Applied Research on Development of Technological Assessment of Metal Ores and Industrial Minerals at Early Stages of Geological Exploration. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2006, pp. 7–17. (in Russian)

Пирогов Б. И. Поведение минералов в единой геолого-техногенной системе // Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологических процессах. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2012. С. 14–29.
Pirogov B. I. Mineral behaviour in a single geological-technogenic system. Methods of evaluation of technological properties of minerals and their behaviour in technological processes. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2012, pp. 14–29. (in Russian)

Пирогов Б. И. Срастания минералов и структурный анализ руд в технологической минералогии // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. С. 7–27.
Pirogov B. I. Mineral accretions and structural analysis of ores in technological mineralogy. Technological mineralogy in the optimisation of ore preparation and mineral raw material beneficiation processes. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2014, pp. 7–27. (in Russian)

Пирогов Б. И., Щипцов В. В. История Комиссии по технологической минералогии РМО (ВМО) с прологом // Зап. РМО. 2016. Ч. 1, вып. 7. С. 84–103.
Pirogov B. I., Shchiptsov V. V. History of the Commission on Technological Mineralogy RMS (All-Union MS) with a prologue. Proc. RMS, 2016, part 1, 7, pp. 84–103. (in Russian)

Ревнивцев В. И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых // Записки ВМО. 1982. Вып. 4. С. 4–20.
Revnivtsev V. I. Role of technological mineralogy in mineral processing. Proc. All-Union MS, 1982, V. 4, pp. 4–20. (in Russian)

Роль технологической минералогии в рациональном недропользовании: Материалы Российского совещания с международным участием. М.: ВИМС. 2018. 234 с.
Role of technological mineralogy in rational subsoil use (proceedings of the Russian meeting with international participation) — Moscow: VIMS, 2018, 234 p. (in Russian)

Туресебеков А. Х., Шукуров Н. Э., Шарипов Х. Т., Алабергенов Р. Д., Зунунов А. Ч., Шукуров Ш. Р. Техногенные отходы — новый источник сырья цветных, благородных, редких и токсичных металлов Алмалыкского горно-металлургического комбината // Минералого-технологическая оценка новых видов минерального сырья. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. С. 31–35. DOI: https://doi.org/10.17076/tm13_4
Turesebekov A. H., Shukurov N. E., Sharipov H. T., Alabergenov R. D., Zununov A. C., Shukurov Sh. R. Technogenic waste — a new source of raw materials of non-ferrous, noble, rare and toxic metals Almalyk Mining and Metallurgical Combine. Mineral and technological evaluation of new types of mineral raw materials. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2019, pp. 31–35. (in Russian)

Щипцов В. В. Роль и место технологической минералогии в высоких технологиях XXI века // Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 37–46.
Shchiptsov V. V. Role and place of technological mineralogy in high technologies of the XXI century. Prognostic assessment of technological properties of minerals by methods of applied mineralogy. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2013, pp. 37–46. (in Russian)

Щипцов В. В., Котова О. Б., Ожогина Е. Г., Пирогов Б. И. Технологическая минералогия во всем пространстве // Труды КарНЦ РАН (серия «Геология докембрия»). 2021. № 10. С. 44–66. DOI: 10.17076/geo1481
Shchiptsov V. V., Kotova O. B., Ozhogina E. G., Pirogov B. I. Technological mineralogy comprehensively. Proceedings of the KarSC RAS, 2021, No. 10, pp. 44–66. DOI: 10.17076/geo1481 (in Russian)

Юсупов Т. С. Новые технологические решения переработки и использования минерального сырья на основе изменения структуры и свойств минералов // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 23–27.
Yusupov T. S. New technological solutions for processing and utilisation of mineral raw materials on the basis of changing the structure and properties of minerals. Technological mineralogy, methods of mineral raw materials processing and new materials. Petrozavodsk. KarSC RAS, 2010, pp. 23–27. (in Russian)

14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019) / S. Glagolev, editor. Belgorod, Russia: 2019, Belgorod state Technological University named after V. G. Shukhov, 23–27 September. 488 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0

15th International Congress for Applied Mineralogy (15th ICAM). Abstracts Book. Ed. Fagin Dong, Hailian Dong, Hiancay Lu, O. Kotova. Chengdu, China: 2023, 135 p.

Ahtola T., Gautneb H., Halberg A., Philippov N., Shchiptsov V., Voytekhovsky Yu. Industrial minerals deposits of the Fennoscandian shield (the FODD project) // Промышленные минералы: проблемы прогноза, поисков, оценки и инновационные технологии освоения месторождений. Казань: Казанская недвижимость, 2015. С. 3–6.

Ahtola T., Gautneb H., Halberg A., Philippov N., Shchiptsov V., Voytekhovsky Yu. Industrial minerals deposits of the Fennoscandian shield (the FODD project). Industrial minerals: problems of forecasting, prospecting, assessment and innovative technologies for deposit development. Kazan: Kazanskaya Nedvizhimost Publishing House, 2015, pp. 3–6.

Shchiptsov V. V. Technological mineralogy from academician V. M. Severgin to the present day. Vestnik of Geoscience, 2021, No. 4, pp. 20–24, DOI: 10.19110/geov.2021.4.3

Gautneb H., Ahtola T., Bergman N., Gonzalez J., Halberg A., Litvinenko V., Shchiptsov V., Voytekhovsky Yu. Industrial minerals deposits map of the Fennoscandian shield // Proceedings of the 12th Biennial Meeting «Mineral deposit research for a high-tech world» — Uppsala: 2013, vol. 4, Elanders Sverige AB. P. 1767–1769.

Редакторы издательства:
О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка:
Р. А. Шуктомов

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 29.11.2024. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 5. Тираж 140. Заказ 1237. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). *Редакция, издательство, типография:* издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Адрес: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. *Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта:* vestnik@geo.komisc.ru
На обложке использованы фото А. Перетягина, Р. Шайбекова, С. Исаенко, Н. Уляшевой, Ю. Голубевой.