



Vestnik of Geosciences
Вестник геонаук

Февраль
February
2024,
№ 2 (350)

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*

Chief Editor *A. M. Askhabov*

Deputy Chief Editor *I. N. Burtsev*

Deputy Chief Editor *O. B. Kotova*

Executive Secretary *I. V. Kozyreva*

Редакционный совет

Л. Н. Андричева, 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
В. А. Каширцев, Новосибирск, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, 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
В. Н. Пучков, Екатеринбург, Россия
Д. Ю. Пуцаровский, Москва, Россия
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
Ш. Сан, Мянъян, 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*

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
V. A. Kashirtcev, Novosibirsk, Russia
M. Komac, Ljubljana, Slovenia
S. V. Krivovichev, St. Petersburg, Russia
S. K. Kuznetsov, Syktyvkar, 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
V. N. Puchkov, Yekaterinburg, 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, Ekaterinburg, 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 (2022) – 0.385



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 (2022) – 0.385

Содержание

Content

Научные статьи

Scientific articles

Минералого-геохимические свойства «моренного» комплекса голоценовых отложений в озере Нижнем (Восточная Антарктида) как источник новой генетической информации <i>В. И. Силаев, В. П. Зерницкая, В. Н. Филиппов, И. В. Смолева, Г. В. Игнатьев, Б. А. Makeev, А. Ф. Хазов, Ю. Г. Гигиняк, А. А. Гайдашов</i>3	Mineralogical and geochemical properties of the “Moraine” complex of Holocene sediments in Lake Nizhneye (East Antarctica) as a source of new genetical information <i>V. I. Silaev, V. P. Zernitskaya, V. N. Filippov, I. V. Smoleva, G. V. Ignatiev, B. A. Makeev, A. F. Khazov, Yu. G. Giginyak, A. A. Gajdashov</i>3
Условия образования рудовмещающих нижнесреднепалеозойских осадочных формаций Чаткало-Кураминских гор Узбекистана <i>М. А. Мундузова</i>17	Conditions for the formation of ore-bearing Lower-Middle Paleozoic sedimentary formations of the Chatkal-Qurama Mountains of Uzbekistan <i>M. A. Munduzova</i>17
Влияние факторов водной среды на минерализацию цианобактерий и зеленых водорослей (Республика Коми) <i>Т. П. Митюшева, В. И. Каткова, В. Н. Филиппов, Е. М. Тропников, Е. Н. Патова</i>30	Influence of aquatic environmental factors on mineralisation of cyanobacteria and green algae (Komi Republic) <i>T. P. Mityusheva, V. I. Katkova, V. N. Filippov, E. M. Tropnikov, E. N. Patova</i>30
От находок угольной гальки к открытию месторождений (к 100-летию Печорского угольного бассейна) <i>И. С. Астахова</i>38	From the find of coal pebbles to the discovery of deposits (the 100 th anniversary of the Pechora coal basin) <i>I. S. Astakhova</i>38
Примесный состав берилла из сподуменовых пегматитов месторождения Пашки (провинция Нуристан, Афганистан) <i>С. Г. Скублов, Н. Хамдard, М. А. Иванов, А. К. Гаврилчик, В. С. Стативко</i>46	Impurity composition of beryl from spodumene pegmatites of Pashki deposit (Nuristan province, Afghanistan) <i>S. G. Skublov, N. Hamdard, M. A. Ivanov, A. K. Gavrilchik, V. S. Stativko</i>46

Хроника, события, факты. История науки

Chronicle, events, facts. History of Science

День российской науки — 2024 в Институте геологии.....51	The Day of Russian Science — 2024 in the Institute of geology.....51
---	---

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting



Минералого-геохимические свойства «моренного» комплекса голоценовых отложений в озере Нижнем (Восточная Антарктида) как источник новой генетической информации

В. И. Силаев¹, В. П. Зерницкая², **В. Н. Филиппов¹**, И. В. Смолева¹, Г. В. Игнатьев¹,
Б. А. Макеев¹, А. Ф. Хазов¹, Ю. Г. Гигиняк³, А. А. Гайдашов⁴

¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, silaev@geo.komisc.ru

² Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, vazern@gmail.com

³ Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам, Минск, antarctida_2010@mail.ru

⁴ Республиканский центр полярных исследований, Минск, polusbellxi@gmail.com

С использованием комплекса минералого-геохимических методов исследован базальный осадочный горизонт («моренный» осадочный комплекс) в озере Нижнем на территории Восточной Антарктиды. Проанализированы валовый химический состав, микроэлементы, породообразующие и акцессорные минералы, углеродное вещество. По всем данным исследованные осадочные отложения являются по своей природе вулканогенными, как минимум частично образованными за счет эксплозивных продуктов извержения вулкана Эребус.

Ключевые слова: Антарктида, озеро Нижнее, «моренный» осадочный комплекс, минералого-геохимические свойства

Mineralogical and geochemical properties of the “Moraine” complex of Holocene sediments in Lake Nizhneye (East Antarctica) as a source of new genetical information

V. I. Silaev¹, V. P. Zernitskaya², **V. N. Filippov¹**, I. V. Smoleva¹, G. V. Ignatiev¹,
B. A. Makeev¹, A. F. Khazov¹, Yu. G. Giginyak³, A. A. Gajdashov⁴

¹ Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

² Institute for Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

³ Scientific and practical center of the National Academy of Sciences of Belarus for bioresources, Minsk

⁴ State Institution Republican Center for Polar Research, Minsk

Using a complex of mineralogical and geochemical methods, the basal sedimentary horizon (“moraine” sedimentary complex) in Lake Nizhny in East Antarctica was studied. The bulk chemical composition, microelements, rock-forming and accessory minerals, and carbon matter were analyzed. According to all data, the studied sedimentary deposits are volcanogenic in nature, at least partially formed due to explosive products of eruptions of Mount Erebus.

Keywords: Antarctica, Lake Nizhneye, “moraine” sedimentary complex, mineralogical and geochemical properties

Введение

Восточная Антарктида — кратон с возрастом древнейших горных пород — двупироксеновых и амфибол-биотитовых гнейсов, плагиогнейсов, чарнокитов, рапаквивиподобных чарнокитов, чарнокитоподобных эндебитов, гранитоидов — 2.8–1.1 млн лет (Мясников и др., 2021). Терригенный осадочный чехол и ледниковые отложения с возрастом 350–190 млн лет образовались здесь в период вхождения Антарктиды в суперконтинент Пангея. Распад Пангеи с возникновением суперконтинента Гондваны отмечен в Антарктиде мощным этапом вулканической деятельности с возрастом 180–110 млн лет. Образование самостоятельного материка Антарктида с его миграцией к южному полюсу произо-

шло в результате распада Гондваны 130–86 млн л. н. Крупнейшим действующим вулканом Антарктиды является Эребус (Силаев и др., 2020), расположенный на острове Росса и возникший 1.3 млн л. н. на краю Западно-Антарктической рифтовой системы на субстрате тонкой континентальной коры (17–25 км). Из зарегистрированных к настоящему времени эффузивных извержений крупнейшие приходятся на периоды (тыс. л. н.): 95 ± 9; 76 ± 4; 27 ± 3; 21 ± 4. Максимумы проявления эксплозивной активности датируются хронологическими интервалами (тыс. л. н.): 77–56; 46–32; 18–10. Именно с последним интервалом эксплозивной активности и коррелируется базальный горизонт в колонке голоценовых осадков Нижнего озера¹, известный как «моренный» осадочный комплекс.

¹ Проточное озеро, расположенное вблизи полярной станции Молодежной с координатами 67°40' ю. ш., 46°09' в. д., высотой над уровнем моря 41 м, площадью 0.015 км² и максимальной глубиной 4 м.

Для цитирования: Силаев В. И., Зерницкая В. П., Филиппов В. Н., Смолева И. В., Игнатьев Г. В., Макеев Б. А., Хазов А. Ф., Гигиняк Ю. Г., Гайдашов А. А. Минералого-геохимические свойства «моренного» комплекса голоценовых отложений в озере Нижнем (Восточная Антарктида) как источник новой генетической информации // Вестник геонаук. 2024. 2 (350). С. 3–16. DOI: 10.19110/geov.2024.2.1

For citation: Silaev V. I., Zernitskaya V. P., Filippov V. N., Smoleva I. V., Ignatiev G. V., Makeev B. A., Khazov A. F., Giginyak Yu. G., Gajdashov A. A. Mineralogical and geochemical properties of the “Moraine” complex of Holocene sediments in Lake Nizhneye (East Antarctica) as a source of new genetical information. Vestnik of Geosciences, 2024, 2 (350), pp. 3–16, doi: 10.19110/geov.2024.2.1

Исследования озер, расположенных в оазисах, обрамляющих ледниковый щит Антарктиды, и на прилегающих к материкам островах, показали, что начало озерного седиментогенеза связано с потеплением климата в голоцене и чаще всего датируется его оптимальной фазой. Помимо данных о возрасте отложений, климатических и природных событиях, эти осадочные архивы содержат информацию о транспортировке различных макро- и микрочастиц (пыльца, споры, тephра, пепел, сажа, частицы горных пород и т. д.) воздушными и водными потоками. Можно предположить, что частицы, переносимые ветром, оседают на ледниках и снежном покрове, попадали в озеро с талыми водами в летние периоды.

Объекты и методы исследований

Территория исследования расположена в оазисе Вечернем, в восточной части Холмов Тала (Земля Эндерби) (рис. 1). Объектами изучения стали придонные осадки раннеголоценового возраста из озера Нижнего и поверхностные пробы снега, отобранные вблизи российской сезонной полевой базы «Молодежная» ($67^{\circ}39'56''$ ю. ш., $45^{\circ}50'26''$ в. д.) и белорусской полевой базы «Гора Вечерняя» ($67^{\circ}39'35''$ ю. ш., $46^{\circ}09'18''$ в. д.) (фото на обложке). Озеро Нижнее расположено в понижении, вытянутом между грядами, высота которых над уровнем моря на юго-востоке достигает 78.7 м (сopка Рубин), а на западе — 272 м (г. Вечерняя). Преобладающую часть территории занимают скалистые гряды и холмы, сложенные в основном гнейсами и плагинейсами чарнокитовой серии (Каратаев, 2016). Проточные воды поступают в озеро Нижнее из котловины со стороны озер Верхнее-1, -2, расположенных севернее. В самые теплые малоснежные сезоны озеро Нижнее вскрывается ото льда в северной части, а полное освобождение озерной акватории от ледникового покрова было зафиксировано лишь в 1967 г. (Александров, 1985). Согласно многолетним метеорологическим наблюдениям, проводимым на станции «Молодежная» (Molodezhnaja station), среднегодовая температура воздуха в рассматриваемом районе составляет -9.8°C , максимальная среднемесячная температура приходится на январь (-0.4°C) с абсолютным максимумом $+9.3^{\circ}\text{C}$ (декабрь 1989 г.), а минимальная — на август (-8.8°C) при абсолютном минимуме -42°C . Осадки выпадают здесь в виде снега — менее 350 мм/год. В прибрежных районах Холмов Тала преобладают восточные (в летние месяцы) и юго-восточные ветры — циклонические, кататические и переходные.

Отбор кернa и поверхностных проб снега для исследований проводился во время сезонной белорусской антарктической экспедиции (БАЭ) 2020—2021 гг. Образцы снега (верхние 2 см) отбирались в стерильные пластиковые бьюксы объемом 100 мл. Бурение на озере производилось со льда, мощность которого составляла 3 м при глубине воды 2 м. Применялся бур длиной 7.5 м. Поднятый керн заморозили и в таком состоянии доставили в ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам», где его распилили на фрагменты по 5 см и отправили в морозильник на хранение при -20°C . Совокупная колонка кернa составила по мощности 195 см (рис. 2). В верхней



Рис. 1. Район исследований, на врезке отмечен красным прямоугольником

Fig. 1. The study area is marked with a red rectangle in the inset

своей части керн содержал водоросли и цианобактерии, ниже располагались озерные илы, рыхлые в сухом виде и варьирующие по окраске от темно-оливковых до темно-серых. Ранее (2011—2012 гг.) образцы из этого водоема, отобранные в ходе совместных работ российской и белорусской антарктических экспедиций, изучались в Институте географии РАН, ФГБУ «АНИИ» (Санкт-Петербург), Научно-практическом центре и Институте природопользования НАН Беларуси (Минск) с применением AMS-датирования, диатомового и изотопного анализов, биологических и гидрохимических исследований (Гигиняк и др., 2016; Dolgich et al., 2017; Zazovskaja et al., 2017). Согласно этим данным, начало осадкообразования в озере Нижнем приходится на ранний голоцен: калиброванные даты в пределах 9300—8400 лет.

Непосредственным объектом наших исследований послужили образцы так называемого моренного осадочного комплекса, отобранные из литологической колонки на глубине 170—175 м — обр. № 3, 185—190 м — обр. № 4 и 190—195 м — обр. № 5. Материал в образцах в целом характеризуется гравийно-псаммитовым гранулометрическим составом (рис. 3), но при этом варьируется по относительному содержанию отдельных фракций (табл. 1). В нижнем образце содержание фракций немного возрастают при переходе от гравийно-грубопсаммитовой к среднепсаммитовой, а затем скачкообразно (в 9—3.5 раз) увеличивается в части мелкотонкопсаммитовой. В среднем образце, напротив, в ряду фракций в направлении от гравийно-грубопсаммитовой к среднепсаммитовой наблюдается сокращение содержания, а потом умеренный рост содержания мелкотонкопсаммитовой фракции. В верхнем образце относительные содержания фракций последовательно увеличиваются в направлении от гравийно-грубопсаммитовой до мелкотонкопсаммитовой.

Таким образом, обнаруживается существенная гранулометрическая неоднородность исследуемых образцов, наиболее резко выраженная сильным преобладанием наиболее мелкой фракции в нижнем образце, немного сокращающаяся в среднем образце при максимальном для исследованных образцов содержании гравийно-грубопсаммитовой фракции

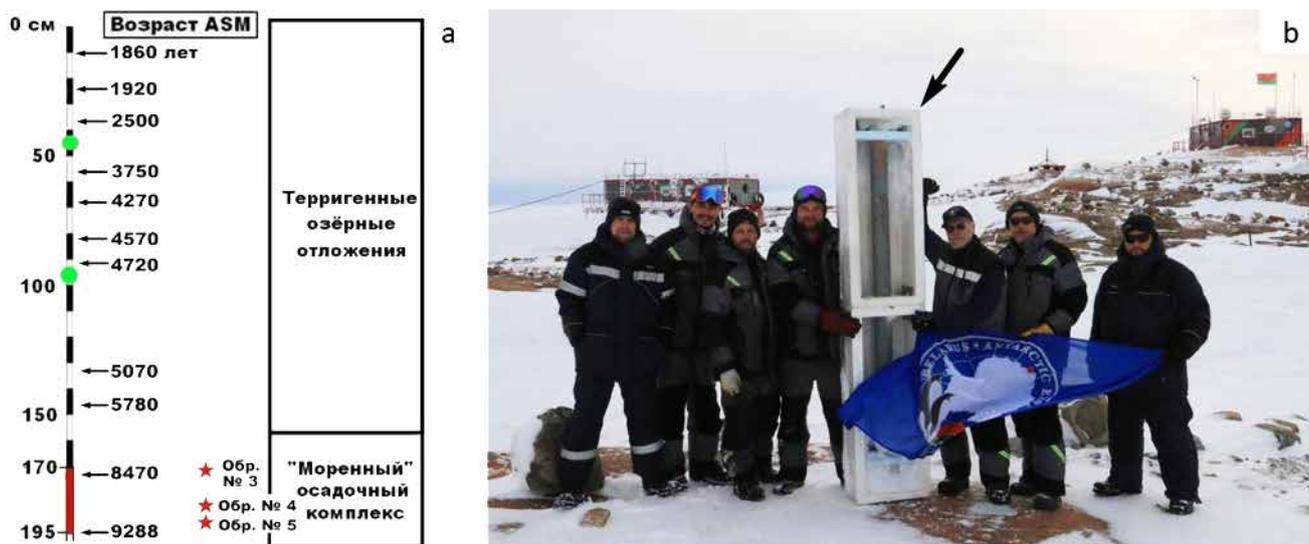


Рис. 2. Схематическое изображение литологической колонки осадков в оз. Нижнем (а), красный интервал — «моренный» осадочный комплекс (красными звездами показаны места отбора образцов, зеленые кружки — места отбора растительного материала) и керн исследованных отложений на полевой базе белорусской антарктической экспедиции (b)
Fig. 2. Schematic representation of the lithological column of sediments in the lake (a). The lower, red interval is a “moraine” sedimentary complex (red stars show sampling sites, green circles indicate plant material sampling sites) and a core of studied sediments at the field base of the Belarusian Antarctic Expedition (b)



Рис. 3. Гранулометрическая неоднородность исследованных образцов
Fig. 3. Granulometric heterogeneity of the studied samples

Таблица 1. Гранулометрический состав исследованных образцов озерных осадков, вес. %
Table 1. Granulometric composition of the studied samples of lake sediments, wt. %

№ обр. Sample No.	Глубина отбора, м Sampling depth, m	Гранулометрические фракции, мм / Granulometric fractions, mm			
		+1	-1+0.5	-0.5+0.25	-0.25
3	170—175	17.6	20.9	22	39.5
4	185—190	28.2	15.4	15	41.4
5	190—195	7.57	7.15	19	66.28

Примечание: фракции: (+1) — гравийно-грубосаммитовая, (-1+0.5) — крупносаммитовая, (-0.5+0.25) — средне-саммитовая, (-0.25) — мелкотонкосаммитовая

Note: fractions: (+1) — gravel-coarse-psammitic, (-1+0.5) — coarse-psammitic, (-0.5+0.25) — medium-psammitic, (-0.25) — fine-fine-psammitic

и еще более уменьшающаяся в верхнем образце с образованием в нем четкой гранулометрической последовательности.

В дополнение к литологическим образцам анализировались твердые частицы в отобранных образцах снега. Эти образцы размораживались, водный раствор центрифугировался, а оставшийся осадок заливался глицерином. Полученный материал исследовался под

биологическим микроскопом ВК5000 с цифровой видеокамерой. Исследования показали, что в составе снега наибольшее распространение имеют частицы совершенно остроуголой формы, характерной для вулканических пеплов, и размером от 35×20 до 350×125 мкм (рис. 4). Примесью к таким частицам выступают округлые углеродные частицы размером 20—150 мкм (рис. 5).

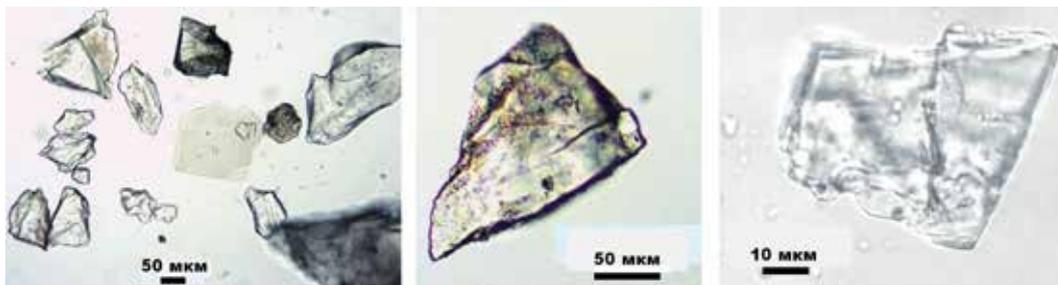


Рис. 4. Типичная форма вулканогенных микрочастиц в исследованных образцах

Fig. 4. Typical shape of volcanogenic microparticles in the studied samples

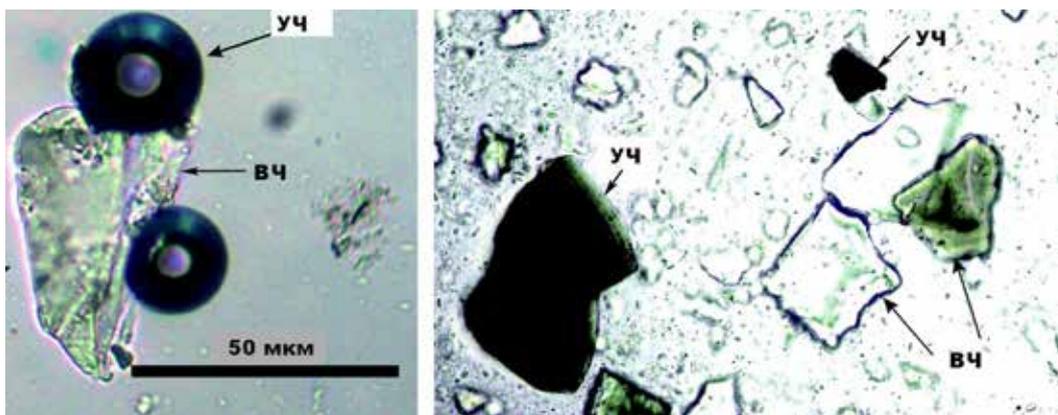


Рис. 5. Вулканогенные (ВЧ) и углеродные (УЧ) частицы в исследованных образцах

Fig. 5. Volcanogenic (BЧ) and carbon (УЧ) particles in the studied samples

В ходе исследований применялись аналитическая сканирующая электронная микроскопия (JSM-6400 Jeol с энергодисперсионным и волновым спектрометрами), рентгенофлуоресцентный анализ (XRF-1800 Shimadzu), рентгеновская дифрактометрия (XRD-6000 Shimadzu), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (Agilent 7700x фирмы Agilent Technologies, США); изотопная масс-спектрометрия углерода (DeltaV+Advantage с аналитическим процессором Thermo Fisher Scientific), стронция и неодима (Triton Plus Thermo Fisher Scientific). Большая часть анализов была осуществлена в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Химический состав и микроэлементы

По валовому химическому составу (табл. 2) материал моренного осадочного комплекса с оз. Нижнего соответствует вулканическим породам — в основном андезибазальтам и в небольшой степени дацитам. На TAS-диаграмме (рис. 6) поля состава проанализированных образцов располагаются в промежутке между областями состава голоценовых островодужных вулканитов Камчатки (Силаев и др., 2018, 2019, 2022) и пеплов непосредственно с вулкана Эребус (Силаев и др., 2020) и Флегрейских полей в Италии (Мелекесцев и др., 1984). Последние иногда рассматриваются как коренной источник материала, широко рассеивающегося по акваториям вплоть до сильно южных широт. Кроме того, на TAS-диаграмме приведено поле состава вулканического стекла из глинистых осадков Северо-Западной котловины Тихого океана (Петрова, 2005) как типичный пример дистанционного обогащения

голоценовых осадочных пород вулканогенным материалом.

Весомым доказательством вулканогенной природы материала в исследуемом «моренном» горизонте озерных осадков могут служить данные об изотопном составе в них стронция и неодима. Согласно полученным нами данным, значения изотопных коэффициентов $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ составляют соответственно 0.70336—0.7050 и 0.5128—0.5130, что почти совпадает с аналогичными данными не только по пеплам Эребуса, но и вообще по вулканическим островам южной акватории Тихого океана (Panter et al., 2006).

В составе вулканогенных осадков моренного горизонта выявлены 46 микроэлементов (табл. 3), суммарное содержание которых колеблется в узких пределах 1800—1950 г/т. Это примерно в два раза уступает балансу микроэлементов непосредственно в пеплах недавнего извержения Эребуса, но при этом ассоциации микроэлементов в осадках оз. Нижнего и в вулканических пеплах принципиально схожи по геохимическим свойствам. Так, в число зарегистрированных микроэлементов в осадках и пеплах входят элементы платиновой группы (Pd, Pt, Rh), ряд характерных сидерофильных и халькофильных элементов, серебро, а тренды хондритнормированных содержаний лантаноидов имеют принципиальное сходство (рис. 7). На диаграмме Ti/100–Zr–3Y Дж. А. Пирса точки исследованных образцов попали в поле вулканогенных базальтоидов дна океана. А с позиции глобальной геохимической эволюции (Щербаков, 1976; Силаев, 1987; Кокин и др., 2023) ассоциация микроэлементов в моренных осадках обогащена центростремительными (I_1) и минимально-центробежными (I_2) элементами относи-



Таблица 2. Валовый химический состав образцов и их гранулометрических фракций, мас. %

Table 2. Gross chemical composition of samples and their granulometric fractions, wt. %

№ обр. Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
3	59.41	0.64	16.59	7.94	0.1	4.14	4.96	2.67	3.29	0.26
3/1	58.8	0.71	16.93	8.3	0.12	4.25	4.58	2.59	3.51	0.22
3/2	59.57	0.63	16.64	7.82	0.11	4.11	4.83	2.73	3.32	0.24
3/3	60.06	0.63	16.34	7.76	0.11	4.08	4.9	2.65	3.26	0.23
3/4	59.25	0.64	16.56	7.95	0.11	4.12	5.21	2.69	3.18	0.3
4	61.25	0.53	16.17	7.12	0.11	3.47	5.54	3.04	2.73	0.29
4/1	60.58	0.56	16.25	7.48	0.11	3.47	5.36	2.97	2.95	0.28
4/2	61.22	0.53	16.29	7.11	0.1	3.32	5.31	3.02	2.82	0.27
4/3	61.79	0.51	16.1	6.94	0.1	3.17	5.37	3.05	2.7	0.27
4/4	61.52	0.5	16.09	6.95	0.1	3.01	5.79	3.15	2.56	0.32
5	62.03	0.5	15.98	6.9	0.11	2.75	5.79	3.17	2.47	0.3
5/1	65.33	0.46	15.29	5.95	0.08	2.22	4.46	3.1	2.92	0.19
5/2	61.96	0.51	16.2	6.9	0.1	2.89	5.48	3.1	2.6	0.27
5/3	61.73	0.53	16.1	7.01	0.1	3.01	5.59	3.11	2.56	0.27
5/4	61.65	0.5	16.03	7.0	0.1	2.72	6.05	3.23	2.38	0.33

Примечание: результаты РФА приведены к 100 %: 3, 4, 5 — валовый химический состав; 3/1—3/4, 4/1—4/4, 5/1—5/4 — химический состав гранулометрических фракций.

Note: XRF results are adjusted to 100 %: 3, 4, 5 — gross chemical composition; 3/1—3/4, 4/1—4/4, 5/1—5/4 — chemical compositions of granulometric fractions.

Рис. 6. Диаграмма TAS, характеризующая химизм магматических пород. Точки и поля на диаграмме: 1 — пикриты; 2, 3 — пикриты соответственно умеренно-щелочные и щелочные; 4 — фойдиты; 5—8 — пикробазальты соответственно ультраосновные, умеренно-щелочные, щелочные, основные; 9 — базальты; 10 — трахибазальты; 11 — базальты щелочные; 12 — андезибазальты; 13 — трахиандезиты; 14 — фонотефриты; 15 — андезиты; 16 — трахиандезиты; 17 — тефрифонолиты; 18 — дациты низкощелочные; 19 — дациты; 20 — трахидациты; 21 — трахиты; 22 — трахиты щелочные; 23 — фonoлиты; 24 — риодациты; 25 — трахириодациты; 26 — риодациты умеренно-щелочные; 27 — риодациты щелочные; 28 — риолиты низкощелочные; 29 — риолиты нормально-щелочные; 30 — риолиты умеренно-щелочные; 31 — риолиты щелочные. Серии: низкощелочная, нормально-щелочная, умеренно-щелочная, щелочная. Состав вулканитов: I — эффузивная серия Эребуса; II—V — пеплы и стеклофаза в них с извержения Эребуса 2000 г.; Км — продукты извержений камчатских вулканов; Фл — вулканиты с Флегрейских полей в Италии; СЗКТО — вулканическое стекло из глинистых осадков Северо-Западной котловины Тихого океана; Н-3, 4, 5 — исследуемые вулканогенные осадки в озере Нижнем

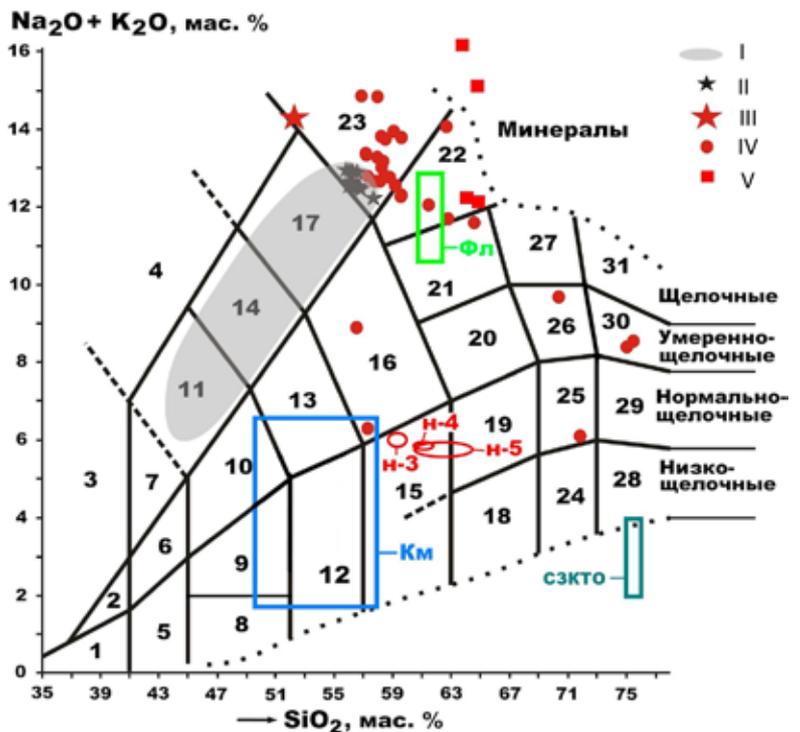


Fig. 6. TAS diagram characterizing the chemistry of igneous rocks. Points and fields on the diagram: 1 — picrites; 2, 3 — picrites, moderately alkaline and alkaline, respectively; 4 — foiditis; 5—8 — picrobasalts, respectively, ultrabasic, moderately alkaline, alkaline, basic; 9 — basalts; 10 — trachybasalts; 11 — alkaline basalts; 12 — basaltic andesites; 13 — basaltic trachyandesites; 14 — phonotephrites; 15 — andesites; 16 — trachyandesites; 17 — trachytes; 18 — low-alkaline dacites; 19 — dacites; 20 — trachydacites; 21 — trachytes; 22 — phonolites alkaline; 23 — phonolites; 24 — rhyodacites; 25 — trachyrhyodacites; 26 — rhyodacites moderately alkaline; 27 — rhyolites alkaline; 28 — rhyolites low-alkaline; 29 — rhyolites normal-alkalin; 30 — rhyolites moderately alkaline; 31 — rhyolites alkaline. Series: NiShch — low alkaline, NoShch — normal alkaline, UmShch — moderately alkaline, Shch — alkaline. Composition of volcanics: I — effusive series of Erebus; II—V — ashes and glass phase in them from the Erebus eruption in 2000; Км — products of eruptions of Kamchatka volcanoes; Фл — volcanics from the Phlegrean fields in Italy; СЗКТО — volcanic glass from clayey sediments of the Northwest Pacific basin; Н-3, 4, 5 — studied volcanogenic sediments in Lake Nizhneye

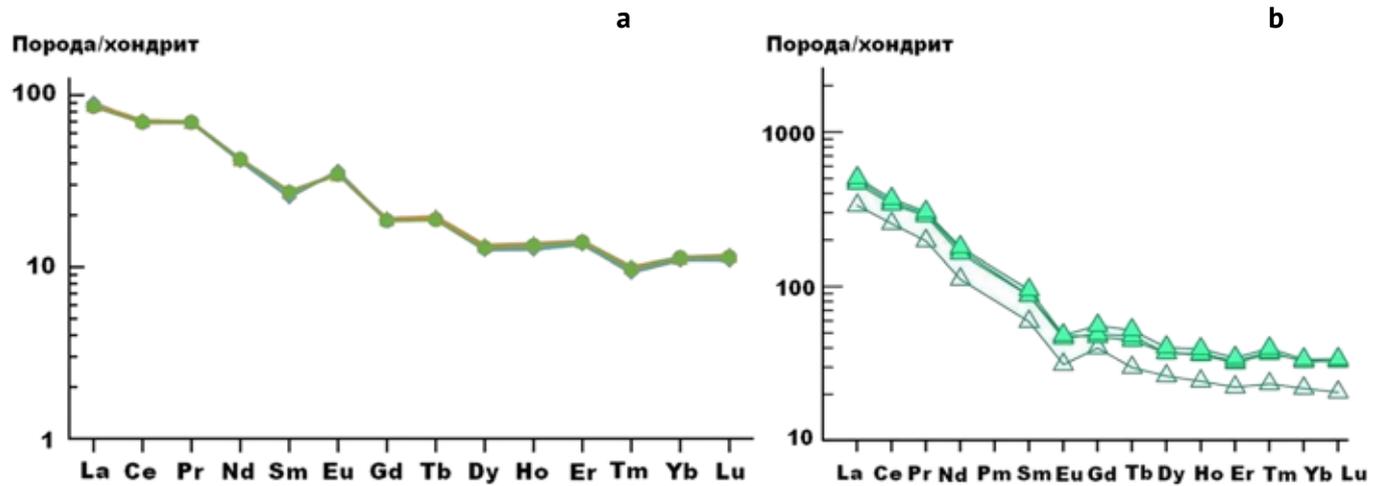


Рис. 7. Хондритнормированные содержания лантаноидов в исследованных образцах с оз. Нижнего (а) и в пеплах извержения Эребуca (b)

Fig. 7. Chondrite-normalized lanthanide contents in the studied samples with Lake Nizhneye (a) and in the ashes of the Erebus eruption (b)

Таблица 3. Средние содержания микроэлементов в исследованных образцах, г/т

Table 3. Average contents of microelements in the studied samples, ppm

Элементы Elements	№ 3		№ 4		№ 5	
	Среднее Average	СКО / RMS	Среднее Average	СКО / RMS	Среднее Average	СКО / RMS
I	2	3	4	5	6	7
Cr	54.25	2.75	49.5	0.577	47.25	6.946
Ni	26.75	2.36	36.75	3.096	19.5	3.109
Co	16.75	1.71	14.5	0.577	12.75	1.893
Rh	0.067	0.01	0.074	0.003	0.065	0.011
Pd	3.475	0.222	3.55	0.318	3.15	0.818
Pt	не обн. / n/d		0.007	0.015	0.012	0.023
Сумма Π_1 -элементов Sum of Π_1 -elements	101.292	6.651	104.541	3.7	82.727	12.461
Sc	14.75	0.5	15.0	2.16	13.3	3.0
V	108.5	7.326	99.75	2.5	98.25	2.5
Сумма Π_2 -элементов Sum of Π_2 -elements	123.25	7.182	114.75	2.63	111.55	2.92
Ga	16.75	0.96	15.5	0.58	15.75	0.5
Y	22.0	2.16	23.25	2.22	22.0	4.97
Nb	8.13	0.76	7.3	0.42	7.0	0.69
Mo	0.12	0.09	0.2	0.12	0.14	0.15
Ag	0.13	0.03	0.24	0.11	0.18	0.12
Cd	2.63	0.36	2.8	0.42	2.75	0.34
Cs	1.98	0.31	1.33	0.21	1.0	0.18
Ta	0.5	0.05	0.47	0.05	0.42	0.11
Bi	не обн. / n/d		не обн. / n/d		0.01	0.02
Th	7.43	0.9	7.48	0.75	7.65	0.31
Сумма Π_3 -элементов Sum of Π_3 -elements	59.64	3.79	58.56	3.27	56.9	5.62
Li	14.75	2.36	11.075	1.53	9.2	0.812
Be	1.25	0.06	1.425	0.26	1.325	0.15
Rb	76.5	11.39	57.5	6.191	53.25	7.089
Sr	355.25	9.11	382.75	13.15	374.0	25.781



Окончание табл. 3 / End of table 3

1	2	3	4	5	6	7
Ba	970.75	85.66	915.5	36.428	932.75	95.087
Zr	42.25	8.1	55.75	18.301	59.25	12.01
Hf	1.45	0.24	1.775	0.435	1.95	0.3
W	0.04	0.07	0.155	0.127	0.065	0.13
Pb	14.25	0.96	15.0	0.816	15.0	1.826
U	1.55	0.25	1.325	0.15	1.24	0.244
La	29.75	3.59	29.0	1.826	28.25	2.986
Ce	59.25	7.93	61.25	4.425	59.5	7.141
Pr	6.9	0.86	7.0	0.523	6.925	0.921
Nd	26.0	3.16	26.75	2.062	26.5	3.873
Sm	5.15	0.66	5.575	0.435	5.475	0.988
Eu	2.78	0.22	2.675	0.096	2.65	0.173
Gd	7.4	0.75	7.625	0.64	7.4	0.128
Tb	0.88	0.1	0.92	0.063	0.882	0.191
Dy	4.5	0.41	4.8	0.424	4.625	0.957
Ho	0.88	0.09	0.955	0.098	0.925	0.217
Er	2.7	0.33	2.825	0.33	2.775	0.585
Tm	0.37	0.05	0.4	0.053	0.387	0.099
Yb	2.4	0.22	2.5	0.271	2.475	0.538
Lu	0.37	0.05	0.397	0.062	0.385	0.096
Сумма лантаноидов Sum of lanthanoids	149.33		152.672		149.154	
Сумма Ц ₄ -элементов Sum of Ц ₄ -elements	1627.36	68.3	1594.928	66.943	1597.185	59.959
Сумма микроэлементов Sum of microelements	1911.542		1872.779		1848.362	
Ц ₄₊₃ /Ц ₁₊₂	7.51		7.54		8.51	

Примечание: элементы: Ц₁ — центростремительные; Ц₂ — минимально-центробежные; Ц₃ — дефицитно-центробежные; Ц₄ — центробежные.

Note: elements: Ц₁ — centripetal; Ц₂ — minimally centrifugal; Ц₃ — deficit-centrifugal; Ц₄ — centrifugal microelements.

тельно дефицитно-центробежных (Ц₃) и центробежных (Ц₄) даже в большей степени, чем непосредственно пеплы Эребуса, особенно в расчете удельно на элемент в каждой ЦЦС-группе.

Минерально-фазовый состав

Минерально-фазовый состав исследованных образцов в целом и по отдельным фракциям однообразен. В породообразующей части он определяется частями вулканического стекла, соответствующего по химическому составу основным пикробазальтам и фолиту (табл. 4), а также кварцем, полевыми шпатами, слюдами, хлоритами, амфиболом и спорадически пироксенном.

Фазовая диагностика породообразующих минералов осуществлялась рентгено-дифракционным методом по наборам характеристических отражений.

Кварц (d, Å; в квадратных скобках — кристаллографические индексы): (4.26—4.28) [100]; (3.34—3.36) [101]; 2.46 [110]; (2.28—2.29) [102]; 2.24 [111]; 2.13 [200]; (1.979—1.984) [201]; (1.818—1.820) [112]; 1.799 [003]; (1.672—1.675) [202]; (1.653—1.657) [103]; (1.606—1.607) [210]; (1.542—1.543) [211].

Полевые шпаты: (6.42—6.48) [–110]; 6.39 [001]; 5.85 [–1–11]; (4.04—4.06) [–201]; (3.86—3.89) [1–11]; (3.76—3.78) [–130]; (3.65—3.67) [130]; (3.48—3.49) [–1–12]; (3.2—3.22) [–220]; 3.18 [002]; (3.13—3.15) [220]; (3.0—3.01) [1–31]; (2.94—2.95) [0–41]; 2.93 [0–22]; 2.90 [–2–22]; 2.85 [131]; (2.81—2.83) [–1–32]; (2.65—2.66) [–132]; (2.52—2.54) [2–21]; 2.49 [–241]; 2.46 [–240]; 2.43 [221]; 2.42 [–1–51]; 2.39 [–310]; (2.34—2.35) [–151]; 2.30 [–331]; (2.11—2.13) [2–41]; (2.04—2.05) [–402]; (2.01—2.02) [–401]; (1.98—1.984) [061]; 1.918 [–4–22]; (1.881—1.884) [–260]; (1.851—1.852) [–403]; (1.827—1.829) [11–3]; (1.818—1.820) [260]; (1.798—1.802) [–170]; (1.776—1.780) [–204]; (1.743—1.750) [2–42]; (1.740—1.742) [420]; (1.722—1.725) [062]; 1.717 [–441]; 1.694 [–442]; (1.653—1.657) [242]; 1.622 [353]; (1.570—1.571) [0–24]; 1.542 [351].

По данным рентгеноспектрального микрозондового анализа (табл. 5), полевые шпаты в основном представлены плагиоклазами андезин-олигоклазового минального состава — (Na_{0.7–0.79}Ca_{0.21–0.3})[(Al_{1.21–1.29}Fe_{0–0.02})Si_{2.72–2.79}O₈] и анортоклазами — (Na_{0.34–0.8}Ca_{0.07–0.32}Ba_{0–0.01}K_{0.02–0.48})[Al_{1.12–1.39}Fe_{0–0.1}Si_{2.51–2.88}O₈]. В последних плагиоклазовая компонента тоже является андезин-олигоклазом. Примесь к плагиоклазам и анортоклазам выступает калиевый полевой шпат состава



Таблица 4. Химический состав вулканического стекла, мас. %

Table 4. Chemical composition of volcanic glass, wt. %

Компоненты Components	1	2	3	4	5
SiO ₂	48.6	62.91	47.25	46.5	45.91
TiO ₂	1.05	не обн. / n/d	1.12	1.08	1.69
Al ₂ O ₃	12.6	20.44	10.67	11.58	13.36
Fe ₂ O ₃	14.74	0.78	15.82	15.4	17.65
MnO	0.53	не обн. / n/d	не обн. / n/d	0.3	0.34
MgO	11.01	0.76	12.21	11.43	10.17
CaO	9.73	не обн. / n/d	11.32	10.87	9.08
Na ₂ O	не обн. / n/d	2.52	не обн. / n/d	1.43	не обн. / n/d
K ₂ O	1.72	10.8	1.61	1.41	1.8
BaO	не обн. / n/d	1.79	не обн. / n/d	не обн. / n/d	не обн. / n/d

Примечание: 1, 3, 4, 5 — пикробазальты основные; 2 — фонолит.

Note: 1, 3, 4, 5 — basic picrobasalts; 2 — phonolite.

Таблица 5. Химический состав полевых шпатов, мас. %

Table 5. Chemical composition of feldspars, wt. %

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	64.96	64.83	66.04	52.34	63.03	63.98	60.94	60.53	63.04
TiO ₂	1.0	не обн. n/d							
Al ₂ O ₃	17.18	18.42	22.13	33.4	22.99	18.47	23.99	24.52	23.29
Fe ₂ O ₃	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	0.26	2.89	0.63	0.52	не обн. n/d
CaO	—	—	—	4.01	4.4	1.55	5.87	6.34	4.29
Na ₂ O	—	—	9.56	3.29	8.99	6.35	7.85	8.09	9.38
K ₂ O	16.86	16.75	2.27	6.96	0.37	6.76	0.72	не обн. n/d	не обн. n/d

Эмпирические формулы / *empiric formulas*:

1 — K_{0.99}[(Al_{0.99}Ti_{0.03})_{1.02}Si₃O₈]; 2 — K[AlSi₃O₈]; 3 — (Na_{0.8}Ca_{0.12}K_{0.08})[Al_{1.12}Si_{2.88}O₈];

4 — (K_{0.48}Na_{0.34}Ca_{0.18})[Al_{1.18}Si_{2.82}O₈]; 5 — (Na_{0.77}Ca_{0.21}K_{0.02})[(Al_{1.2}Fe_{0.01})_{1.21}Si_{2.79}O₈];

6 — (Na_{0.56}K_{0.36}Ca_{0.07}Ba_{0.01})[Al_{1.39}Fe_{0.1}Si_{2.51}O₈]; 7 — (Na_{0.68}Ca_{0.28}K_{0.04})[(Al_{1.26}Fe_{0.02})Si_{2.72}O₈];

8 — (Na_{0.7}Ca_{0.3})[(Al_{1.26}Fe_{0.02})_{1.28}Si_{2.72}O₈]; 9 — (Na_{0.79}Ca_{0.21})[Al_{1.21}Si_{2.79}O₈].

K_{0.99-1}[Al_{0.99-1}Ti_{0-0.01}Si₃O₈]. Очевидно, что именно полиминеральный и минерально-смешанный состав ассоциации полевых шпатов и объясняет мультисложный характер приведенной выше комбинации рентгеновских отражений. На диаграмме смесимости большая часть анализов анортоклазов отвечает калишпат-содержащему олигоклазу, некоторые — санидину. Один анализ попал в поле несмесимости. Все это подтверждает вулканогенное происхождение материала в исследованных озерных осадках.

Слюда: (10.10—10.28) [002]; (4.99—5.09) [004]; 2.49 [008]; 2.00 [0010]. Судя по приведенным рентгеновским отражениям и составу (табл. 6) — (K_{0.86-1.04}Ca_{0-0.03})_{0.89-1.04}(Al_{0.59-1}Fe_{0.99-1.41})_{1.99-2}[AlSi₃O₁₀](OH)_{1.89-2.04} — слюда может быть отнесена к мусковиту-алюмоселадониту.

Хлориты: (14.36—14.73) [001]; (7.07—7.21) [002]; (3.54—3.55) [004]. Рентгеновские данные соответствуют клинохлору-пикнохлориту.

Амфибол: (8.46—8.54) [110]; 4.50 [040]; 3.88 [–131]; (3.24—3.25) [240]; (3.13—3.15) [310]; (2.93—2.94) [–151]; 2.72 [–331]; (2.60—2.61) [061]; (2.55—2.57) [241]; 2.38 [350]; 2.34 [–351]; (2.16—2.17) [–332]; (2.01—2.02) [351]. Судя по отражениям, является роговой обманкой.

Клинопироксен: 3.00 [22–1]; 2.53 [002].

В качестве акцессорных минералов в исследованных образцах обнаружены эпидот-алланит состава (Ca_{2.3-2.35}La_{0.1-0.11}Ce_{0.21-0.25}Pr_{0-0.04}Nd_{0-0.09})_{1.96-2}(Al_{2.3-2.35}Fe_{0.63-0.66})_{2.96-2.98}[S₃O₁₂](OH)_{1.12-1.45}, поликомпонентный циркон (Zr_{0.97-0.99}Hf_{0-0.02}Fe_{0-0.01}Ca_{0-0.01})_{0.99-1.01}[SiO₄] (рис. 8, а; табл. 6) и магнетит, встречающийся не только в зернах, но и в виде характерных для вулканических пеплов магнитных шариков (рис. 8, с). По минеральному составу этот минерал является магнезиоферрит-герцинит-магнетитом со спорадической примесью хромита, кулсонита и якобсита (табл. 7). Очевидно, что примесь в исследованном магнетите таких атомно-плотных минералов, как магнезиоферрит



Таблица 6. Химический состав слюды (1, 2), эпидота-алланита (3, 4) и циркона (5–9), мас. %
Table 6. Chemical composition of mica (1, 2), epidote-allanite (3, 4) and zircon (5–9), wt. %

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	43.89	42.62	36.34	34.94	32.76	32.88	32.39	32.77	33.07
ZrO ₂	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	66.04	66.25	65.51	65.29	66.19
HfO ₂	«	«	«	«	1.2	0.87	2.1	1.94	не обн. n/d
Al ₂ O ₃	24.85	19.2	23.69	23.28	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	«
Fe ₂ O ₃	19.25	25.63	10.71	9.81	«	«	«	«	0.44
La ₂ O ₃	не обн. n/d	не обн. n/d	3.59	3.45	«	«	«	«	не обн. n/d
Ce ₂ O ₃	«	«	7.1	7.812	«	«	«	«	«
Pr ₂ O ₃	«	«	не обн. n/d	1.18	«	«	«	«	«
Nd ₂ O ₃	«	«	«	3.08	«	«	«	«	«
CaO	«	«	18.57	16.42	«	«	«	«	0.3
K ₂ O	«	«	не обн. n/d	не обн. n/d	«	«	«	«	не обн. n/d

Эмпирические формулы / empiric formulas:

1 – (K_{0.86}Ca_{0.03})_{0.89}(AlFe_{0.99})_{1.99}[AlSi₃O₁₀](OH)_{1.89}; 2 – K_{1.04}(Al_{0.59}Fe_{1.41})₂[AlSi₃O₁₀](OH)_{2.04};

3 – (Ca_{1.64}La_{0.11}Ce_{0.21})_{1.96}(Al_{2.3}Fe_{0.66})_{2.96}[Si₃O₁₂](OH)_{1.12};

4 – (Ca_{1.51}La_{0.1}Ce_{0.25}Pr_{0.04}Nd_{0.09})₂(Al_{2.35}Fe_{0.63})_{2.98}[Si₃O₁₂](OH)_{1.43}; 5 – (Zr_{0.98}Hf_{0.01})_{0.99}[SiO₄];

6 – (Zr_{0.98}Hf_{0.01})_{0.99}[SiO₄]; 7 – (Zr_{0.99}Hf_{0.02})_{1.01}[SiO₄]; 8 – (Zr_{0.97}Hf_{0.02})_{0.99}[SiO₄]; 9 – (Zr_{0.98}Fe_{0.01}Ca_{0.01})[SiO₄].

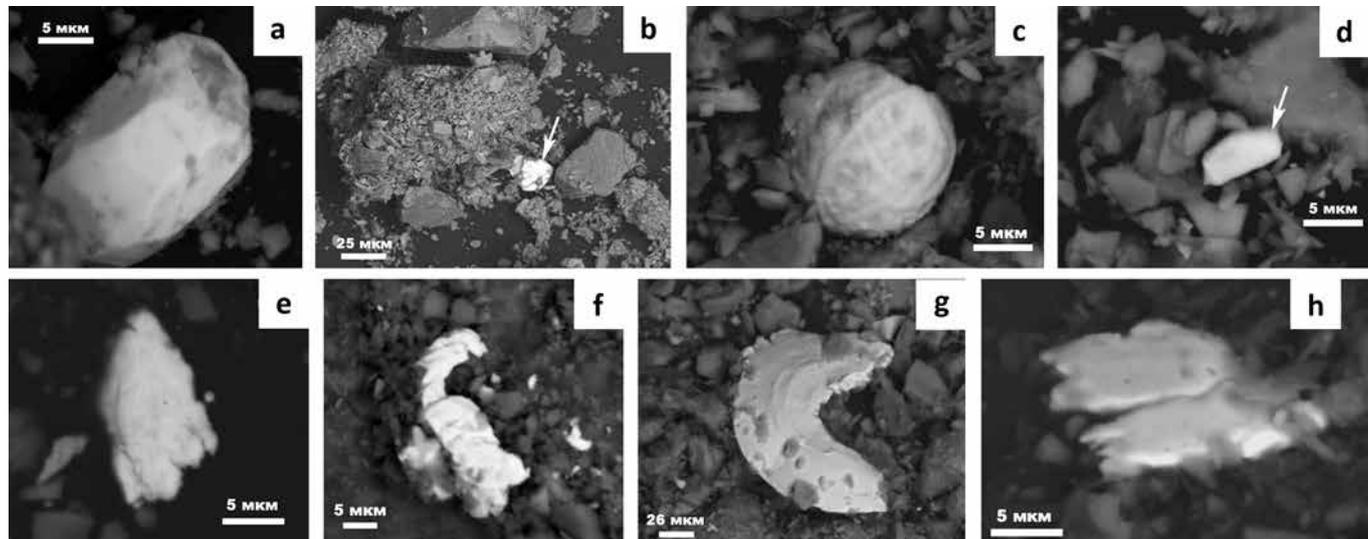


Рис. 8. Микроминералы в составе вулканогенных осадков оз. Нижнего, СЭМ-изображения в режиме упругоотраженных электронов. а, b — обр. № 5, соответственно циркон и монацит (показан стрелкой); с–h — обр. № 4, соответственно магнетит, ильменит-ферроколумбит-ферротанталит (показан стрелкой), хлораргирит, сплавы состава Fe-Cr-Ni-Mn и Ni-Cu-Zn-Fe, латунь

Fig. 8. Microminerals in the composition of volcanogenic sediments of Lake Nizhneye, SEM images in elastically reflected electron mode. а, b — sample No. 5, zircon and monazite, respectively (shown by an arrow); с–h — sample No. 4, respectively magnetite, ilmenite-ferrocolumbite-ferrotantalite (shown by an arrow), chlorargyrite alloys of the composition Fe-Cr-Ni-Mn and Ni-Cu-Zn-Fe, brass

и герцинит, свидетельствует не только о его вулканогенном происхождении, но и о кристаллизации в достаточно глубинных условиях.

Помимо вышеупомянутых минералов в исследованных образцах обнаружены фосфаты, хлориды, ок-

сиды и металлические сплавы. Фосфаты представлены цериевой разновидностью монацита (рис. 8, b; табл. 8) — (Ce_{0.37–0.38}La_{0.16–0.21}Pr_{0.03–0.06}Nd_{0.15–0.16}Sm_{0.02–0.05}Gd_{0.02–0.05}Y_{0.12–0.13}Th_{0.01–0.02}Ca_{0.04–0.05})_{0.99–1}[PO₄]. В качестве хлорида выступает гидроксильная



Таблица 7. Химический состав магнетита, мас. %
Table 7. Chemical composition of magnetite, wt. %

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe ₂ O ₃	95.2	92.17	96.15	97.61	96.57	96.04	92.91	98.55
Al ₂ O ₃	2.87	7.83	2.54	не обн. n/d	1.14	3.11	3.82	0.82
Cr ₂ O ₃	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	0.28	0.59	не обн. n/d	0.81	не обн. n/d
MgO	1.93	«	1.31	не обн. n/d	1.07	«	1.77	«
MnO	не обн. n/d	«	не обн. n/d	2.4	не обн. n/d	«	не обн. n/d	«
V ₂ O ₅	«	«	«	не обн. n/d	0.63	0.85	0.69	0.63

Миналы, мол. % / Minals, mol. %

Магнетит / Magnetite FeFe ₂ O ₄	82.5	82.5	86.5	92.5	89.5	91.5	79.5	97.0
Кулсонит / Kulsonite FeV ₂ O ₄	0	0	0	0	1	1.5	1	1
Герцинит / Herzinite FeAl ₂ O ₄	6.5	17.5	5.5	0	2.5	7	8.5	2
Магнезиоферрит Magnesioferrite MgFe ₂ O ₄	11	0	8	0	6	0	10	0
Хромит / Chromite FeCr ₂ O ₄	0	0	0	0.5	1	0	1	0
Якобсит / Yakobsite MnFe ₂ O ₄	0	0	0	7	0	0	0	0

Эмпирические формулы / *empiric formulas*:

1 – (Fe_{0.89}Mg_{0.11})(Fe_{1.87}Al_{0.13})₂O₄; 2 – Fe₃(Fe_{1.65}Al_{0.35})₂O₄; 3 – (Fe_{0.92}Mg_{0.08})(Fe_{1.89}Al_{0.11})₂O₄;

4 – (Fe_{0.93}Mn_{0.07})(Fe_{1.99}Cr_{0.01})₂O₄; 5 – (Fe_{0.94}Mg_{0.06})(Fe_{1.91}Al_{0.05}Cr_{0.02}V_{0.02})₂O₄;

6 – Fe(Fe_{1.83}Al_{0.14}V_{0.03})₂O₄; 7 – (Fe_{0.9}Mg_{0.1})(Fe_{1.79}Al_{0.17}Cr_{0.02}V_{0.02})₂O₄; 8 – Fe(Fe_{1.94}Al_{0.04}V_{0.02})₂O₃.

Таблица 8. Химический состав монацита, мас. %
Table 8. Chemical composition of monazite, wt. %

Компоненты Components	1	2
P ₂ O ₅	31.63	31.52
Y ₂ O ₃	6.77	6.43
La ₂ O ₃	11.71	13.59
Ce ₂ O ₃	27.95	27.46
Pr ₂ O ₃	4.05	2.46
Nd ₂ O ₃	11.43	10.97
Sm ₂ O ₃	1.99	2.1
Gd ₂ O ₃	1.93	1.84
ThO ₂	1.33	2.34
CaO	1.21	1.29

Эмпирические формулы / *empiric formulas*:

1 – (Ce_{0.38}La_{0.16}Pr_{0.06}Nd_{0.16}Sm_{0.03}Gd_{0.02}Y_{0.13}Th_{0.01}Ca_{0.04})_{0.99}[PO₄];

2 – (Ce_{0.37}La_{0.21}Pr_{0.03}Nd_{0.15}Sm_{0.02}Gd_{0.03}Y_{0.12}Th_{0.02}Ca_{0.05})_{0.99}[PO₄].

разновидность хлораргирита (рис. 8, d; табл. 9) – AgCl_{0.52–0.69}(OH)_{0.29–0.48}. В качестве аксессуарных оксидов установлены поликомпонентный ильменит и уникальная система твердофазных смесей ильменит-фер-

Таблица 9. Химический состав гидроксихлораргирита, мас. %

Table 9. Chemical composition of hydroxychlorargyrite, wt. %

Компоненты Components	1	2	3
Ag	81.58	85.35	85.68
Cl	18.17	14.65	14.32
S	0.25	не обн. n/d	не обн. n/d

Эмпирические формулы / *empiric formulas*:

1 – AgCl_{0.69}S_{0.01}(OH)_{0.29};

2 – AgCl_{0.53}(OH)_{0.47};

3 – AgCl_{0.52}(OH)_{0.48}.

роколумбит-ферротанталит (табл. 10), которая известна только в эндогенных образованиях (Егоров, Арзамасцев, 2018). Ильменит варьируется по составу в пределах (Fe_{0.46–0.93}Mg_{0–0.48}Mn_{0.01–0.19})(Ti_{0.83–1}Al_{0–0.17}), в минальном выражении это: ильменит – 46–93, пикроильменит – 0–48, пиррофанит – 1–19 мол. %. Состав титан-ниобий-танталовых твердофазных смесей оценивается нами как Fe_{1.71–1.92}(Ti_{1.38–1.81}Nb_{0.04–0.42}Ta_{0.13–0.17})₂O₆, что в миналах имеет вид: ильменит – 70–92, ферроколумбит – 1–21, ферротанталит – 7–9 мол. %. Кроме этого, в составе образцов выявлены



Таблица 10. Химический состав ильменита (1–7) и минералов системы ильменит-ферроколумбит-ферротанталит (8, 9), мас. %

Table 10. Chemical composition of ilmenite (1–7) and minerals of the ilmenite-ferrocolumbite-ferrotantalite system (8, 9), wt. %

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TiO ₂	50.98	50.84	50.64	50.67	43.24	51.42	49.24	36.57	32.31
Fe ₂ O ₃	46.06	41.84	42.51	42.14	48.22	23.7	41.15	38.76	39.81
Al ₂ O ₃	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	5.5	0.58	0.99	не обн. n/d	не обн. n/d
MnO	0.63	6.36	6.85	6.34	2.98	22.29	8.62	—	—
MgO	2.33	0.96	не обн. n/d	0.85	не обн. n/d	2.01	не обн. n/d	—	—
V ₂ O ₅	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	—	не обн. n/d	—	0.7	0.72
Ta ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	7.05	10.8
Nb ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	16.92	16.36

Миналы, мол. % / Minerals, mol. %

Ильменит Ilmenite FeTiO ₃	90	82	85	83	94	45	81	92	70
Гейкилит Geykielite MgTiO ₃	9	4	15	3	0	47.5	0	0	0
Пирофанит Pyrophanite MnTiO ₃	1	14	0	14	6	7.5	19	0	0
Ферротанталит Ferrotantalite FeTa ₂ O ₆	0	0	0	0	0	0	0	7	9
Ферроколумбит Ferrocolumbite FeNb ₂ O ₆	0	0	0	0	0	0	0	1	21

Эмпирические формулы / empiric formulas:

1 – (Fe_{0.9}Mg_{0.09}Mn_{0.01})TiO₃; 2 – (Fe_{0.82}Mg_{0.04}Mn_{0.14})TiO₃; 3 – (Fe_{0.84}Mn_{0.15})_{0.99}TiO₃; 4 – (Fe_{0.83}Mg_{0.03}Mn_{0.14})TiO₃; 5 – (Fe_{0.93}Mn_{0.06})_{0.99}(Ti_{0.83}Al_{0.17})O₃; 6 – (Fe_{0.46}Mg_{0.48}Mn_{0.15})_{1.01}(Ti_{0.98}Al_{0.02})O₃; 7 – (Fe_{0.81}Mn_{0.19})(Ti_{0.98}Al_{0.02})O₃; 8 – Fe_{1.92}(Ti_{1.81}V_{0.02}Nb_{0.04}Ta_{0.13})₂O₆; 9 – Fe_{1.71}(Ti_{1.38}V_{0.03}Nb_{0.42}Ta_{0.17})₂O₆.

металлические сплавы трех составов (табл. 11): на основе железа (рис. 8, e) – Fe_{0.68–0.7}Cr_{0.19–0.21}Ni_{0.08–0.1}Mn_{0.01–0.02}, на основе никеля (рис. 8, f) – Ni_{0.43–0.52}Cu_{0.28–0.33}Zn_{0.19–0.23}Fe_{0–0.01}, латунь (рис. 8, g) – Cu_{0.57–0.58}Zn_{0.4–0.42}Sn_{0–0.01}(Ni,Fe)_{0–0.01}.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что по минеральному составу моренные осадки в оз. Нижнем хорошо коррелируются именно с пеплами вулкана Эребус, в которых были выявлены и калишпат-плаггиоклаз-анортоклазовая ассоциация, и поликомпонентный циркон, и монацит, и хлориды, и металлические сплавы. Таким образом, и на минералогическом уровне организации исследуемые осадки могут быть определены как вулканогенные.

Изотопия углерода как генетический индикатор

Обнаружение в осадках моренного осадочного комплекса оз. Нижнего и в образцах снега частиц угле-

родного вещества ставит вопрос о его генетической природе. Предварительно предполагалось, что оно может иметь как природное (растительное), так и антропогенное происхождение. Для решения этого вопроса в соответствующих частицах нами был исследован изотопный состав углерода.

Проведенные исследования показали, что изотопный состав углерода в частицах из моренных осадков очень устойчив и определяется узким интервалом значений коэффициента $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -30... -28$, составляя статистически $(-28.96 \pm 1.01) \%$. Полученные данные кардинально отличаются от данных по водорослям из осадков того же озера $(-9.31... -7.1 \%)$, но близки к изотопному составу эндогенного углерода в продуктах голоценового вулканизма. На соответствующей генеральной диаграмме (рис. 9) изотопные данные, полученные по частицам из осадков оз. Нижнего, лежат в пределах диапазона варьирования значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ в разнообразных углеродных фазах вулканогенного происхождения, особенно сближаясь с углеродными

Таблица 11. Химический состав металлических сплавов на основе железа (1–6), никеля (7, 8) и латуни (9, 10), мас.%
Table 11. Chemical composition of iron-based metal alloys (1–6), nickel (7, 8) and brass (9, 10), wt.%

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	70.62	71.0	68.99	69.82	70.56	68.98	0.56	0.42	0.34	0.45
Cr	18.64	18.55	19.46	18.5	18.73	20.58	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d	не обн. n/d
Ni	9.93	9.87	9.59	10.27	10.22	8.98	49.68	40.76	—	0.5
Mn	0.81	0.58	1.96	1.41	0.49	1.46	не обн. n/d	не обн. n/d	—	не обн. n/d
Cu	не обн. n/d	29.28	33.54	55.88	57.42					
Zn	—	—	—	—	—	—	20.48	25.28	41.93	39.97
Sn	—	—	—	—	—	—	не обн. n/d	не обн. n/d	1.85	1.66

Эмпирические формулы / empiric formulas:

1 — $Fe_{0.7}Cr_{0.2}Ni_{0.09}Mn_{0.01}$; 2 — $Fe_{0.7}Cr_{0.2}Ni_{0.09}Mn_{0.01}$; 3 — $Fe_{0.68}Cr_{0.21}Ni_{0.09}Mn_{0.02}$; 4 — $Fe_{0.69}Cr_{0.2}Ni_{0.1}Mn_{0.01}$;

5 — $Fe_{0.7}Cr_{0.19}Ni_{0.1}Mn_{0.01}$; 6 — $Fe_{0.69}Cr_{0.21}Ni_{0.08}Mn_{0.02}$; 7 — $Ni_{0.52}Cu_{0.28}Zn_{0.19}Fe_{0.01}$;

8 — $Ni_{0.43}Cu_{0.33}Zn_{0.23}Fe_{0.01}$; 9 — $Cu_{0.57}Zn_{0.42}(Sn,Fe)_{0.01}$; 10 — $Cu_{0.58}Zn_{0.4}Sn_{0.01}(Ni,Fe)_{0.01}$

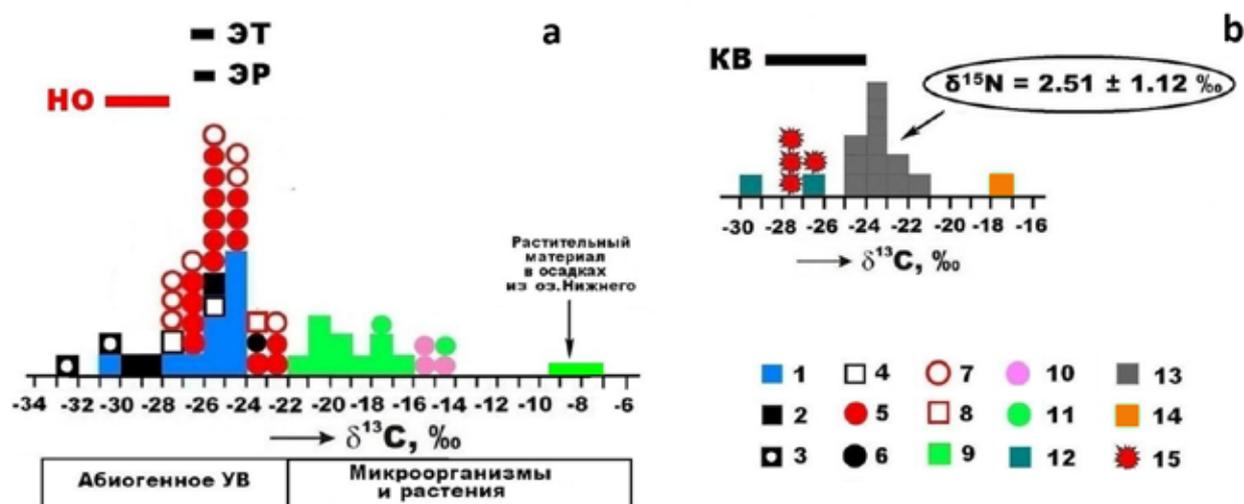


Рис. 9. Изотопный состав углерода в продуктах современного вулканизма на Камчатке и в современных микроорганизмах (а) в сравнении с продуктами вулканизма и рудообразования в рифтовой зоне Срединно-Атлантического хребта и в тephре вулкана Кумбре-Вьяха (б). а: 1–7 — углеродные фазы и минералы: дисперсно-рассеянное углеродное вещество в вулканитах (1), частицы шунгитоподобного вещества (2), парафиноподобная фаза (3), частицы самородного алюминия с включениями углеродного вещества (4), углеродное вещество в fumarole «Ядовитой», алмазы (6), диуглеродные глобулы (7), карбиды (8); 9–11 — микроорганизмы: бактерии (9), дрожжи (10) и хлорелла (11). Рамками показаны диапазоны варьирования изотопного состава углерода в вулканогенных осадках в оз. Нижнем (НО), в пеплах извержений вулканов Эребус, 2000 г. (ЭР) и Этна, 1669 г. (ЭТ). б: 12 — дисперсно-рассеянное углеродное вещество в магматитах, 13 — углеродизированные шлаки, 14 — биогенное органическое вещество на поверхности шлаковых частиц, 15 — дисперсное углеродное вещество в сульфидных рудах с гидротермальных полей САХ — Ашадзе-1, Ашадзе-2, Зенит-Виктория, Коралловое, Краснов, Молодежное, Петербургское, Победа-1, Семенов. Рамками показан диапазон варьирования изотопного состава углерода в пеплах извержения вулкана Кумбре-Вьяха, 2021 г. (KB)

Fig. 9. Carbon isotope composition in the products of modern volcanism in Kamchatka and in modern microorganisms (a) in comparison with the products of volcanism and ore formation in the rift zone of the Mid-Atlantic Ridge and in tephra of the Cumbre-Vyaha volcano (b). а: 1–7 — carbon phases and minerals: respectively dispersed carbon matter in volcanics (1), particles of shungite-like substance (2), paraffin-like phase (3), particles of native aluminum with inclusions of carbon matter (4), carbon matter in the Yadovitaya fumarole, diamonds (6), dicarbon globules (7), carbides (8); 9–11 — microorganisms: respectively bacteria (9), yeast (9) and chlorella (10). The frames show the ranges of variation in the carbon isotope composition in volcanogenic sediments in Lake Nizhneye (HO), in the ashes of the eruptions of volcanoes Erebus, 2000 g. (ЭР) and Etna, 1669 g. (ЭТ). б: 12 — dispersed carbon matter in magmatites, 13 — carbonized slag, 14 — biogenic organic matter on the surface of slag particles, 15 — dispersed carbon matter in sulfide ores from hydrothermal fields of the MAR — Ashadze 1, Ashadze 2, Zenit-Victoria, Coral, Krasnov, Molodezhnoe, Petersburg, Pobeda 1, Semenov. The frames show the range of variations in the carbon isotopic composition in the ashes of the eruption of the Cumbre Viaja volcano, 2021 (KB)



частицами, выявленными в пеплах вулкана Эребус. Таким образом, обнаруженное в моренном осадочном комплексе углеродное вещество является небиологическим и вулканогенным по происхождению.

Выводы

Объектами комплексного минералого-геохимического изучения стали образцы раннеголоценового возраста из моренного осадочного комплекса оз. Нижнего вблизи белорусской полевой базы «Гора Вечерняя». Материал в образцах в целом характеризуется гравийно-псаммитовым гранулометрическим составом, варьирующимся по относительному содержанию гравийно-грубопсаммитовой, крупнопсаммитовой, среднепсаммитовой и мелкотонкопсаммитовой фракций. По валовому химическому составу изученный материал соответствует вулканическим породам — в основном андезибазальтам и в небольшой степени дацитам. Их вулканогенная природа подтверждается изотопным составом стронция и неодима. По ассортименту, балансу и степени геохимической дифференцированности микроэлементов исследованные озерные осадки более всего близки к пеплам вулкана Эребус.

Фазово-минеральный состав изученных отложений определяется частицами вулканического стекла, ортоклаз-плагиоклаз-анортоклазовой ассоциацией полевых шпатов, мусковит-алюмоселадонитом, клинохлор-прохлоритом, эпидот-алланитом, магнетитом с минеральной примесью магнезиоферрита и герцинита, монацитом, гидроксихлораргиритом, Mg-Mn-ильменитом, ильменит-ферроколумбит-ферротанталитовыми твердыми растворами, металлическими сплавами Fe-Cr-Ni-, Ni-Cu-Zn- и Cu-Zn-состава. Эти данные также свидетельствуют о вулканогенной природе исследованных осадков. Углеродное вещество, обнаруженное в моренном осадочном комплексе, является небиологическим и вулканогенным по происхождению.

Таким образом, все данные, полученные по раннеголоценовому «моренному» осадочному комплексу в оз. Нижнем Восточной Антарктиды, характеризуют его как осадочно-вулканогенный, образованный с наибольшей вероятностью за счет взрывных продуктов вулкана Эребус.

Исследования выполнены в рамках государственной программы 23 «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021—2025 годы, подпрограммы 23.2 «Развитие деятельности белорусской антарктической станции», а также в рамках государственной темы Института геологии Коми НЦ УрО РАН № 122040600009-2 «Фундаментальные проблемы минералогии и минералообразования, минералы как индикаторы петро- и рудогенезиса, минералогия рудоносных районов и месторождений Тимана и Североуральского района и арктических территорий».

Литература / References

- Александров М. В. Ландшафтная структура и картирование оазисов Земли Эндерби. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 152 с.
- Aleksandrov M. V. Landscape structure and mapping of the oases of Enderby Land. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 152 p. (in Russian)
- Гигиняк Ю. Г., Бородин О. И., Мямин В. Е. Исследования, проводимые в Антарктике белорусскими биологами // Природная среда Антарктики: современное состояние изученности: Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Минск: Конфидо, 2016. С. 84—94.
- Giginiak Yu. G., Borodin O. I., Miamin V. E. Research conducted in Antarctica by Belarusian biologists. Natural environment of Antarctica: current state of knowledge: Proc. of the 2nd International scientific-practical conf., Minsk: Confido, 2016, pp. 84—94. (in Russian).
- Егоров А. В., Арзамасцев А. А. Та-Nb минерализация в керамических пегматитах Северного Приладожья: состав и условия образования // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2018. Вып. 15. С. 136—139.
- Egorov A. V., Arzamastsev A. A. Ta-Nb mineralization in ceramic pegmatites of the Northern Ladoga region: composition and conditions of formation. Proceedings of the Fersman scientific session of the Geological Institute of the KSC RAS, 2018, 15, pp. 136—139. (in Russian).
- Каратаев Г. И. Проект научных геолого-геофизических исследований в районе белорусской антарктической станции (Гора Вечерняя, Земля Эндерби, Восточная Антарктида) на 2016—2020 годы // Природная среда Антарктики: современное состояние изученности: Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Нарочь, 2016. С. 153—157.
- Karataev G. I. Project of scientific geological and geophysical research in the area of the Belarusian Antarctic station (Mount Vechernyaya, Enderby Land, East Antarctica) for 2016—2020. Natural environment of Antarctica: current state of knowledge: Proc. of the 2nd International Scientific and Practical Conf., Naroch, 2016, pp. 153—157. (in Russian).
- Кокин А. В., Силаев В. И., Кокин М. А., Хазов А. Ф. Периодический закон Д. И. Менделеева, космогеохимическая система Ю. Г. Щербакова и перспективы развития минералого-геохимических исследований // Вестник геонаук. 2023. № 6. С. 29—36.
- Kokin A. V., Silaev V. I., Kokin M. A., Khazov A. F. D. I. Mendeleev's Periodic law, Yu. G. Shcherbakov's cosmochemochemical system and prospects for the development of mineralogical and geochemical research. Vestnik of geosciences, 2023, 6, pp. 29—36. (in Russian)
- Мелекесцев И. В., Кирьянов В. Ю., Праслов Н. Д. Катастрофическое извержение в районе Флегрейских полей (Италия) — возможный источник вулканического пепла в позднелейстоценовых отложениях европейской части СССР // Вулканология и сейсмология. 1984. № 3. С. 35—44.
- Melekestsev I. V., Kirianov V. Yu., Praslov N. D. Catastrophic eruption in the area of the Phlegrean Fields (Italy) is a possible source of volcanic ash in the Late Pleistocene deposits of the European part of the USSR. Vulcanology and Seismology, 1984, 3, pp. 35—44. (in Russian).
- Мясников О. В., Федорова Л. Р., Василенок Е. А. Цифровой атлас горных пород Восточной Антарктиды (Холмы Тала): методы формирования // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий: Материалы II Междунар. науч. конф. Минск: Изд-во БГУ, 2021. С. 290—295.
- Miasnikov O. V., Fedorova L. R., Vasilenok E. A. Digital atlas of rocks of East Antarctica (Tala Hills): formation methods. Problems of regional geology of the West



- of the East European Platform and adjacent territories: Proc. of the 2nd International Scientific Conference. Minsk: BSU Publishing House, 2021, pp. 290–295. (in Russian)
- Петрова В. В.* Низкотемпературные вторичные минералы и их роль в литогенезе (силикаты, алюмосиликаты, гидроксиды). М.: ГЕОС, 2005. 247 с.
- Petrova V. V.* Low-temperature secondary minerals and their role in lithogenesis (silicates, aluminosilicates, hydroxides). Moscow: GEOS, 2005, 247 p. (in Russian)
- Силаев В. И.* Зональность рудных месторождений и полей как отражение геохимической дифференциации. Сыктывкар: Коми научный центр УрО АН СССР, 1987. Вып. 173. 24 с. (Серия препринтов «Научные доклады»).
- Silaev V. I.* Zoning of ore deposits and fields as a reflection of geochemical differentiation. Series of preprints “Scientific reports”. Komi SC UB RAS of Academy of Sciences of the USSR, 1987, 173, 24 p. (in Russian)
- Силаев В. И., Аникин Л. П., Карпов Г. А., Ремизов Д. Н., Мяндин А. С., Филиппов В. Н., Хазов А. Ф., Лютоев В. П., Киселёва Д. В.* Пузыристые лавы алмазопродуктивного Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 гг. (ТТИ-50, Камчатка) // Вестник Пермского университета. 2022. Т. 21. № 3. С. 193–215.
- Silaev V. I., Anikin L. P., Karpov G. A., Remizov D. N., Miandin A. S., Filippov V. N., Khazov A. F., Liutoev V. P., Kiseleva D. V.* Bubbling lavas of the diamond-producing Tolbachik fissure eruption of 2012–2013. (TTI-50, Kamchatka). Bulletin of Perm University, 2022, 21 (3), pp. 193–215. (in Russian)
- Силаев В. И., Карпов Г. А., Аникин Л. П., Вергасова Л. П., Филиппов В. Н., Тарасов К. В.* Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Часть 2. Минералы-спутники алмазов толбачинского типа // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 36–49.
- Silaev V. I., Karpov G. A., Anikin L. P., Vergasova L. P., Filippov V. N., Tarasov K. V.* Mineral-phase paragenesis in explosive products of modern eruptions of Kamchatka and Kuril volcanoes. Part 2. Satellite minerals of Tolbachik type diamonds. *Vulcanology and Seismology*, 2019, 6, pp. 36–49. (in Russian)
- Силаев В. И., Карпов Г. А., Аникин Л. П., Филиппов В. Н., Смолева И. В., Макеев Б. А., Шанина С. Н., Вергасова Л. П., Киселёва Д. В., Солошенко Н. Г., Чередниченко Н. В., Хазов А. Ф., Тарасов К. В.* Петро-минералогеохимические свойства пеплов вершинных извержений вулкана Ключевской 2020–2021 гг., предшествующих побочному извержению Прорыва Горшкова // Вулканология и сейсмология. 2022. № 2. С. 3–27.
- Silaev V. I., Karpov G. A., Anikin L. P., Filippov V. N., Smoleva I. V., Makeev B. A., Shanina S. N., Vergasova L. P., Kiseleva D. V., Soloshenko N. G., Cherednichenko N. V., Khazov A. F., Tarasov K. V.* Petro-mineral-geochemical properties of ashes from the summit eruptions of the Klyuchevskoy volcano in 2020–2021, preceding the secondary eruption of the Gorshkov Proryv. *Vulcanology and Seismology*, 2022, 2, pp. 3–27. (in Russian)
- Силаев В. И., Карпов Г. А., Киселёва Д. В., Вергасова Л. П., Макеев Б. А., Тарасов К. В., Хазов А. Ф.* Пеплы 2017 года с вулканов Ключевского и Камбального: сравнительный минералогический анализ // Вестник Пермского университета. Геология. 2018. № 4. С. 326–341.
- Silaev V. I., Karpov G. A., Kiseleva D. V., Vergasova L. P., Makeev B. A., Tarasov K. V., Khazov A. F.* Ashes of 2017 from the Klyuchevsky and Kambalny volcanoes: comparative mineralogical and geochemical analysis. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2018, 4, pp. 326–341. (in Russian)
- Силаев В. И., Карпов Г. А., Филиппов В. Н., Макеев Б. А., Шанина С. Н., Хазов А. Ф., Тарасов К. В.* Минералогическая геохимическая свойства прикратерной тephры вулкана Эребус (Антарктида) из материалов извержения 2000 г. // Вулканология и сейсмология. 2020. № 4. С. 40–56.
- Silaev V. I., Karpov G. A., Filippov V. N., Makeev B. A., Shanina S. N., Khazov A. F., Tarasov K. V.* Mineralogical and geochemical properties of near-crater tephra of Erebus volcano (Antarctica) from materials of eruptions of 2000. *Vulcanology and seismology*, 2020, 4, pp. 40–56. (in Russian)
- Щербачков Ю. Г.* Геохимическая эволюция и рудные формации // Проблемы эндогенного рудообразования и металлогении. Новосибирск: Наука, 1976. 217–229.
- Shcherbakov Yu. G.* Geochemical evolution and ore formations. *Problems of endogenous ore formation and metallogeny*. Novosibirsk: Nauka, 1976, pp. 217–229. (in Russian)
- Dolgikh A., Alexandrin M., Konstantinov E., Mergelov N., Shishkov V., Zazovskaya E., Gaidashov A., Miamin V., Pushina Z., Verkulich S.* Radiocarbon age of the Holocene deglaciation in the Thala Hills oasis, East Antarctica // Abstracts of the 1st International Workshop on Antarctic permafrost, periglacial processes and soils (ANTPAS) “From an Expert Group to a Research Program”, Varese, Italy, 2017. P. 14.
- Molodezhnaya station* — http://www.aari.aq/stations/mol/mol_en.html
- Panter K.S., Blusztajn J., Hart S.R., Kyle Ph., Esser R., Mchitosh W.C.* The Origin of HIMU in the SW Pacific: Evidence from Intra plate Volcanism in Southern New Zealand and Subantarctic Islands // *Journal Petrol.*, 2006. V. 47. P. 47. P. 1673–1704.
- Zazovskaya E., Gaidashov A., Dolgikh A., Miamin V., Shishkov V., Alexandrin M., Mergelov N., Pushina Z., Verkulich S.* Radiocarbon age of the Holocene deglaciation in the Thala Hills oasis (Enderby Land, East Antarctica) // 2-nd International Radiocarbon in the Environment Conference, Book of Abstracts, Debrecen, Hungary, 2017, P. 83.

Поступила в редакцию / Received 23.01.2024



Условия образования рудовмещающих нижнесреднепалеозойских осадочных формаций Чаткало-Кураминских гор Узбекистана

М. А. Мундузова

Институт геологии и геофизики им. Х. М. Абдуллаева, Ташкент, Узбекистан
mavlyuda.munduzova1956@gmail.com

Статья посвящена описанию стратиформных свинцово-цинковых и полиметаллических залежей в осадочных породах палеозоя юго-западного Тянь-Шаня Чаткало-Кураминских гор с применением ритмостратиграфического анализа, разработанного профессором Ташкентского государственного университета В. И. Поповым (Попов и др., 1963; Попов, 1980). Тектонические движения играют главную роль в формировании новых структурных элементов литосферы и земной поверхности. Существенные тектонические движения распространяются на большие территории, приобретая значение региональных тектонических ритмов. Крупные фазы тектонических движений расчленялись на более мелкие. Наблюдается изменение формационного состава: на границе и в начале ритмосерии преобладают обломочные фации подвижного мелководья (прибойно-обломочные), ближе к поясу – тиховодные или застойные (Попов и др., 1963; Попов, 1980). Исследования проводились на северо-западных склонах Кураминского хребта в верховьях реки Каракия. На участках исследования построены литолого-фациальные разрезы и карты фактических материалов. В фациальном отношении осадки раннего силура формировались в условиях тиховодного (центрально-отстойного) мелководного бассейна, зоны с действием донных течений (донно-течениевого) и дельтового (подводно-дельтового) фациального пояса; девон-нижнекарбоневые отложения накапливались в условиях волноприбойной зоны, залива (мелко-заливного пояса) и подводной дельты (подводно-дельтового пояса).

В нижнесилурийских терригенных формациях выделены три рудоносные пачки с повышенными содержаниями золота, меди, свинца, цинка и ряда других металлов, в девонских осадочных формациях установлены черные доломиты застойной зоны мелководного залива (мелкозаливной фации) с повышенными содержаниями свинца. Приуроченность повышенных концентраций полиметаллов к определенным прослоям и пачкам осадочных доломитовых пород, обогащенных органическим веществом, свидетельствует о сингенетичности накопления рассеянного рудного вещества процессу осадконакопления.

Ключевые слова: черные доломиты, ритмостратиграфия, фациальный пояс, фациальная зона, фация, динамическая палеогеография, осадочные породы, сланцы, мелкозаливная застойная зона

Conditions for the formation of ore-bearing Lower-Middle Paleozoic sedimentary formations of the Chatkal-Qurama Mountains of Uzbekistan

M. A. Munduzova

Institute of Geology and Geophysics named after Kh. M. Abdullayev, Tashkent, Uzbekistan

The article describes stratiform lead-zinc and polymetallic deposits in Paleozoic sedimentary rocks of the southwestern Tien Shan of the Chatkal-Qurama Mountains using rhythmostratigraphic analysis developed by professor at Tashkent State University V. I. Popov (Popov et al., 1963; Popov, 1980). Tectonic movements play a major role in the formation of new structural elements of the lithosphere and the earth's surface. Large tectonic movements spread over large areas and become regional tectonic rhythms. Considerable phases of tectonic movements were divided into smaller phases. We observed the change in formational composition: the boundary and beginning of the rhythm series were dominated by clastic facies of mobile shallow water (surf-clastic), closer to the belt – quiet-water or stagnant (Popov et al., 1963; Popov, 1980). We studied the northwestern slopes of the Qurama ridge in the upper reaches of the Karakiya River. Lithological-facies sections and maps of actual materials were made in the study areas. Early Silurian sediments of the were formed in the conditions of a quiet-water (central-sedimentary) shallow-water basin, zones under the influence of bottom currents (bottom current) and deltaic (underwater deltaic) facies belt; Devonian-Lower Carboniferous sediments were accumulated in wave surf zone, bay (shallow-flood belt) and underwater delta (underwater delta belt).

Three ore-bearing units with high contents of gold, copper, lead, zinc and a number of other metals were identified in the Lower Silurian terrigenous formations. Black dolomites of the stagnant zone of a shallow-water bay (shallow-bay facies) with high contents of lead were identified in the Devonian sedimentary formations. The confinement of increased concentrations of polymetals to certain layers and units of sedimentary dolomite rocks enriched in organic matter indicates that the accumulation of dispersed ore matter is syngenetic to the sedimentation process.

Keywords: black dolomites, ritmostratigraphy, facies belt, facies zone, facies, dynamic paleogeography, sedimentary rocks, shales, shallow-flooded, stagnant zone

Введение

Осадочные формации средне- и верхнепалеозойских отложений Чаткало-Кураминских гор Тянь-Шаня – это одна из страниц ископаемой летописи гор Каратагата. Их колыбелью являются древние моря. В составе формаций наиболее древними образованиями

являются мощные флишоидные толщи метаморфизованных нерасчлененных отложений ордовика и силура, сложенные преимущественно серо-зелеными глинистыми сланцами. Перекрывают их кварцевые порфиры нижнего и среднего девона, на отдельных участках часто прорванные субвулканическими андезито-

Для цитирования: Мундузова М. А. Условия образования рудовмещающих нижнесреднепалеозойских осадочных формаций Чаткало-Кураминских гор Узбекистана // Вестник геонаук. 2024. 2 (350). С. 17–29. DOI: 10.19110/geov.2024.2.2

For citation: Munduzova M. A. Conditions for the formation of ore-bearing Lower-Middle Paleozoic sedimentary formations of the Chatkal-Qurama Mountains of Uzbekistan, 2024, 2 (350), pp. 17–29, doi: 10.19110/geov.2024.2.2



дацитовыми порфирами. В верхнем девоне их сменяет толща прослаивания тонко- и среднеслоистых доломитов, черных, темно-серых, зеленовато-серых мергелей, аргиллитов и песчаников со скоплениями мелкой фауны. Осадочные породы прорваны интрузивными телами, сложенными сиенито-диоритами, гранодиорит-порфирами, дайками и мелкими штоками диабазовых и диоритовых порфиритов (Голованов, 1978).

Стратиформные свинцово-цинковые месторождения Узбекистана представлены барит-пирит-галенит-сфалеритовой, колчеданно-полиметаллической и пирит-сфалерит-колчеданной формациями, которые образовались в результате сложных геологических процессов, происходивших в несколько этапов.

Исследования проводились в верховьях реки Каракия, на северо-западных склонах Кураминского хребта по средне- и верхнедевонским и нижнекаменноугольным отложениям в районе гор Акташкан и Абдулакан и по карбонатной гряде Алтынтопкан. Для выяснения условий образования рудовмещающих среднепалеозойских осадочных формаций и изучения распределения и генезиса полиметаллического оруденения был применен комплексный биоритмостратиграфический корреляционный метод, разработанный В. И. Поповым в 1966 году.

Границы формаций и ритмов внутри формаций проводятся по горизонтам осадков, которые образовались во время максимального развития той или иной тектонической фазы, с чем связано поглубление обломочного материала, появление размывов и угловых несогласий. Тектоническая обстановка в Чаткало-Кураминском регионе имеет некоторое сходство с обстановкой в Неваде. Чакало-кураминские и невадийские месторождения приурочены к участкам коры с наименьшей толщиной слабометаморфизованного осадочного слоя и контролируются относительно менее плотными и более нагретыми участками верхней мантии (Ахмеджанов, 1980¹; Волков, Галямов, 2020).

В нижнесилурийских терригенных формациях выделены три рудоносные пачки с повышенными содержаниями меди, свинца, цинка, золота и ряда других металлов, в девонских осадочных формациях установлены черные доломиты с повышенными содержаниями свинца, цинка и золота. При распределении оруденения в этих формациях немаловажное значение имеют литолого-стратиграфический, структурный и магматический контроль оруденения. Гидротермально-метасоматические преобразования пород выражены окварцеванием, сульфидизацией, ожелезнением, серитизацией, хлоритизацией.

Методика проведенных исследований

Для выяснения условий образования рудовмещающих ниже- и среднепалеозойских осадочных формаций, характера распределения и генезиса золотого, полиметаллического, медного и другого оруденения в них был использован комплексный биоритмостратиграфический корреляционный метод изучения осадоч-

ных формаций, разработанный В. И. Поповым. Этот метод учитывает главнейшие признаки условий образования, петро-, био-, лито- и ритмостратиграфические методы и увязывает между собой сведения о неравномерно-периодическом поступательном развитии осадочных толщ, обусловленные климатическими факторами и пульсирующим характером тектонических движений, которые часто сопряжены во времени.

Методика изучения осадочных пород заключалась в том, что перед полевыми работами производилась рекогносцировка района работ с целью ознакомления его с тектоническим строением, стратиграфией и выбора мест для разрезов. Далее проводится детальное описание по пластам с применением стандартов для характеристики отдельных литологических особенностей. В лабораторный период отобранные образцы подвергались различным анализам: гранулометрическому, микропетрографическому, минералогическому, спектральному, химическому, термическому, электронно-микроскопическому, рентгеноструктурному.

Методика проведения полевых и тематических работ заключалась в отборе проб с опорных разрезов и их лабораторных исследованиях. При описании разрезов большое внимание уделялось замерам ориентированных текстур (косой слойчатости, знакам ряби, борозд размыва). Пробы при составлении разрезов были подвергнуты различного вида анализам: гранулометрическому, микропетрографическому, минералогическому, спектральному, химическому, термическому, электронно-микроскопическому, рентгеноструктурному.

На основании построения литолого-фациальных разрезов в составе нижнесилурийских терригенных формаций выделены три рудоносные пачки с повышенными и высокими содержаниями ряда рудных элементов, что свидетельствует о практической ценности литолого-фациальных исследований. Выявление рудоносных пачек позволяет более целенаправленно проводить поисковые работы. Приуроченность рудоносных пачек к определенным стратиграфическим уровням и к осадкам определенных фаций может свидетельствовать о сингенетическом накоплении повышенных содержаний рудных элементов, способных в результате проявлений эпигенетических процессов дать промышленные скопления элементов.

Полученные данные позволили выяснить ритмостратиграфию, литологию, динамические фации, динамическую палеогеографию и рудоносность силурийских и девон-нижнекарбонатовых осадочных формаций и оценить их перспективность.

Исследованиями были охвачены нижнесилурийские терригенные осадочные формации в бассейне реки Каракия (рис. 1). Средне- и верхнедевонские и нижнекаменноугольные отложения изучались в районе гор Акташкан и Абдулакан и в карбонатной гряде Алтынтопкан. По нижнесилурийским и девон-нижнекаменноугольным формациям составлены 33 разреза. Корреляция разрезов сильно затруднена из-за фациальной изменчивости пород по простиранию, большого количества тектонических нарушений, ослож-

¹ Ахмеджанов А. М. Карбонатные отложения девона и карбона Чаткало-Кураминских гор и их роль в рудообразовании: Автореф. канд. дис. Ташкент, 1980. 13 с.

¹ Akhmedzhanov A. M. Devonian and Carbonate carbonate deposits of the Chatkal-Qurama mountains and their role in ore formation. Abstract of PhD thesis. Tashkent, 1980, 13 p. (in Russian)



няющих стратиграфическую последовательность толщ, из-за различной степени метаморфизма, обусловленной влиянием магматических тел на осадочные породы.

В данном случае под фацией понимается единица физико-географической среды, выраженной в определенных породах и их сочетаниях (Попов и др., 1963). Определение фаций имеет первостепенное значение

для палеогеографии и для поисков различных ископаемых. Определением фации воссоздается ландшафт или физико-географическая среда, в которых образовался осадок в тот или иной отрезок времени геологической истории данного региона (рис. 1, 2). При исследовании девонских формаций применялся комплексный стадийный поступательно-периодический принцип фациального анализа (Попов и др., 1963).

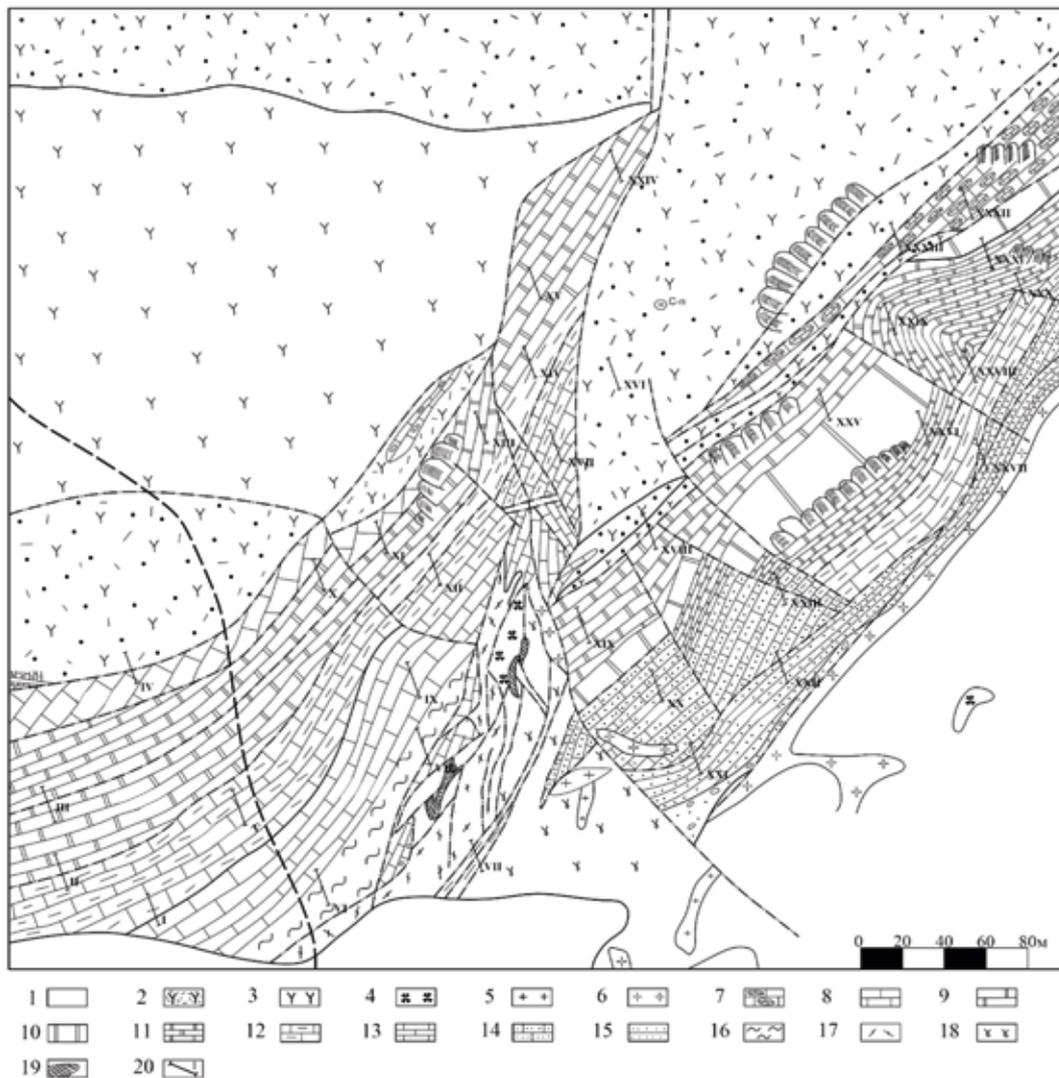


Рис.1. Карта фактических материалов района работ

Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения (лессы – аллювиально-делювиальные отложения); 2 – дациты кристаллические; 3 – андезитовые порфириты; 4 – гранодиорит-порфиры гушайского типа; 5 – гранодиориты кураминского типа; 6 – гранодиорит-порфиры калканатинского типа; 7 – известняки обломочные; 8 – известняки, мирзарабатская свита; 9 – доломиты ленточные, кульатинская ритмосвита; 10 – доломиты черные битуминозные, верхнекарататинская ритмоподсвита; 11 – доломиты с прослоями песчаников и известняков, нижнекарататинская ритмоподсвита; 12 – известняки с прослоями доломитов, умбеитская ритмосвита; 13 – переслаивание известняков и доломитов, джарбулакская ритмосвита; 14 – известняки с прослоями песчаников и аргиллитов, кураминская ритмосвита; 15 – песчаники, гравелиты, алевролиты, машрабская ритмосвита; 16 – глинистые сланцы, сардобская свита сланцы; 17 – кварцевые порфиры и их туфы, калканатинская ритмосвита; 18 – андезитовые порфиры и их туфы; 19 – зоны скарнирования; 20 – литолого-фациальные разрезы

Fig. 1. Map of factual materials of the work area

Legend: 1 – Quaternary deposits (loess – alluvial-deluvial deposits); 2 – crystalline dacites, 3 – andesitic porphyrites; 4 – granodiorite porphyries of the Gushsay type; 5 – granodiorites of the Qurama type; 6 – granodiorite porphyries of the Kalkanata type; 7 – clastic limestones; 8 – limestones, Mirzarabat formation; 9 – banded dolomites, Kulata rhythm-formation; 10 – black bituminous dolomites, Vernekaratagatinskaya rhythm-subformation; 11 – dolomites with interlayers of sandstones and limestones, Nizhnekaratagatinskaya rhythm-subformation; 12 – limestones with interbeds of dolomites, Umbeitskaya rhythm-formation; 13 – interbedded limestones and dolomites, Dzharbulakskaya rhythm-formation; 14 – limestones with interlayers of sandstones and mudstones, Kuraminskaya rhythm-formation; 15 – sandstones, gravelites, siltstones, Mashrabskaya rhythm-formation; 16 – clay shales, Sardoba formation shales; 17 – quartz porphyries and their tuffs, Kalkanatinskaya rhythm-formation; 18 – andesitic porphyries and their tuffs; 19 – skarn zones, 20 – lithological-facies sections

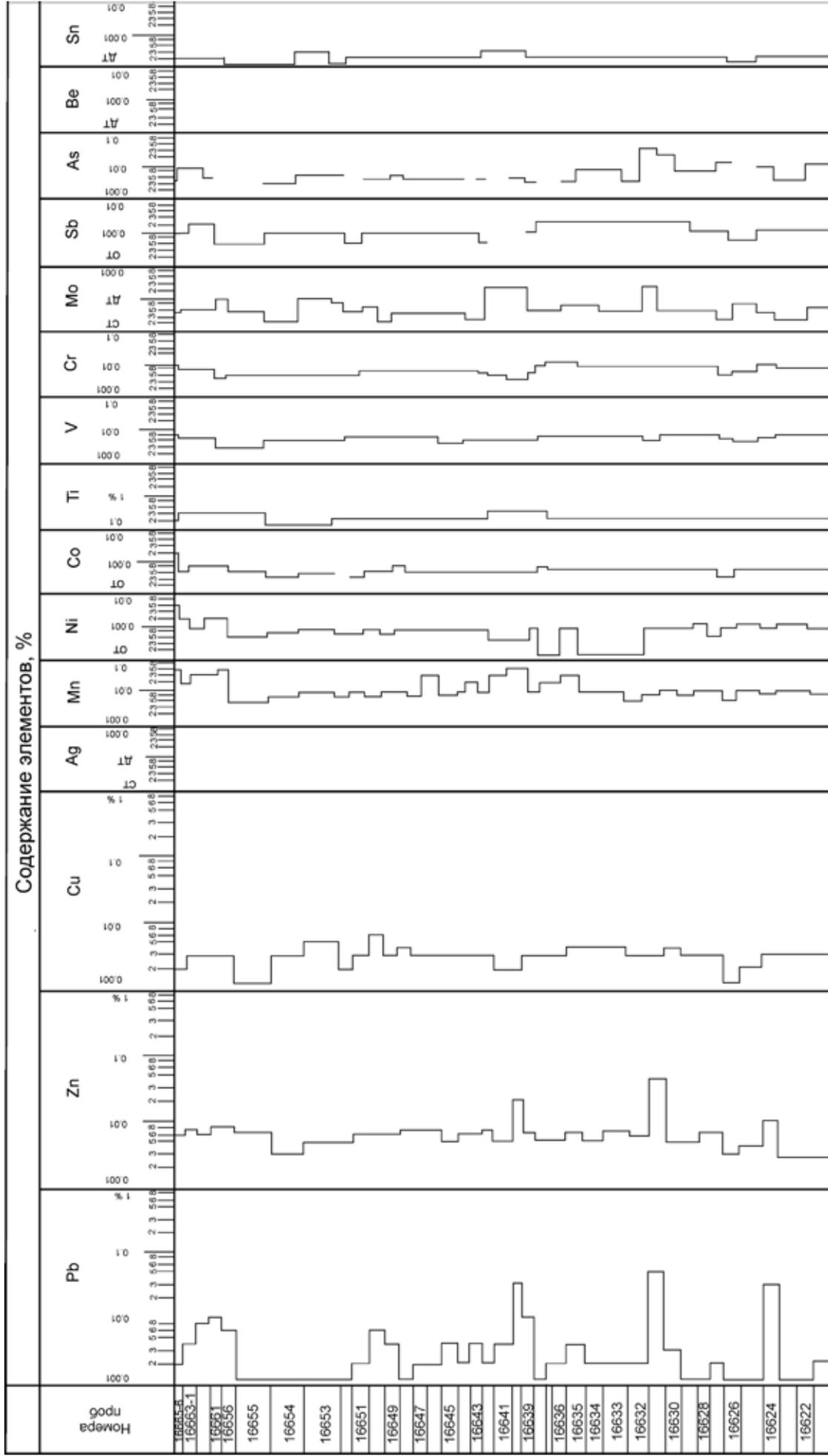
b

Рис. 2. Литограмма нижнесилурийских осадочных формаций участка «Абдулакан» (а, б)

Fig. 2. Layout of Middle Paleozoic sedimentary formations at the "Abdulakan" site (a, b)



Ритмостратиграфия ниже- и средне-палеозойских осадочных формаций

Нижнесилурийские терригенные формации были отнесены к южно-тяньшанскому ритмоподкомплексу, к позднеордовикско-лландоверийской ритмотолще, к ранне- и среднелландоверийской сардобской ритмосвите. В фациальном отношении осадки раннего силура образовались в условиях донно-течениевого и подводно-дельтового фациальных поясов, девон-нижнекарбонные осадки — в условиях волноприбойного, подводно-дельтового поясов. В нижнесилурийских терригенных формациях выделены три рудоносные пачки с повышенными содержаниями золота, свинца, цинка и ряда других металлов, а в девонских осадочных формациях установлены черные доломиты застойной зоны с повышенными содержаниями золота, цинка, свинца, меди, сурьмы, мышьяка, вольфрама, кобальта, молибдена, кадмия, серебра. (Плещенко, Малахова, 1980). Обогащенные органическим веществом (Мундузова, 2004²), они являются подводно-дельтовым фациальным поясом девонских и нижнекаменноугольных осадочных формаций (Barber, 1984; Rye, 1985).

Осадочные формации среднего-верхнего девона и нижнего карбона входят в состав срединно-тяньшанского ритмоподкомплекса. В его составе выделены следующие ритмотолщи и ритмосвиты:

– позднеэйфельско-раннефранская ритмотолща с раннеживетской машрапской, позднеживетской кураминской, раннефранской джарбулакской ритмосвитами;

– позднефранско-фаменская ритмотолща с позднефранской умбеитской, ранне- и позднефаменской каратагатинской, позднефаменской кулятинской ритмосвитами;

– турнейско-средневизейская ритмотолща с турнейской и ранне-, средневизейской ритмосвитами. В турнейской ритмосвите выделяются мирзарабадская и коксуйско-талдыбулакская ритмоподсвиты, а в ранне-, средневизейской ритмосвите — кульчулакская ритмоподсвита.

В девонских и нижнекаменноугольных осадочных формациях установлены осадки следующих фациальных зон: подводно-дельтовых (авандельтовых), мелководного залива (мелкозаливных), волноприбойной зоны и зоны влияния донных течений (донно-течениевых) (рис. 3).

Подводно-дельтовый фациальный пояс представляет собой подводное продолжение дельты рек, впадающих в морской бассейн, и является следующим после равнинно-долинного фациального пояса, в отдельных случаях — продолжением русловых потоков подводного фациального пояса. Слагает почти целиком машрапскую ритмосвиту.

Подводно-дельтовая обломочная зона. Осадки подводно-дельтовой обломочной зоны представлены песчаниками и алевролитами, редко гравелитами. Гравелиты бурые, мелко- и среднегравийные, с крупным гравием. Песчаники мелкозернистые, прослоями алевролитовые, алевролитистые, зеленовато-серые, светло-серые, серые.

Алевролиты желто-зеленые, серые, светло-серые, среднеслоистые, часто ожелезненные, обычно кварцевые.

Подводно-дельтовая иловая зона. Осадки этой зоны встречаются редко в виде единичных прослоев аргиллита зеленого, реже серого, тонкослоистого, с прослоями алевролитистого, в отдельных слоях по 1—1.5 см, реже до 5 см; линзовидно переслаиваются с зеленовато-серым, серо-зеленым, реже серым алевролитом.

В формационном отношении осадки подводно-дельтового фациального пояса относятся к шлировой формации.

Мелкозаливный фациальный пояс представляет собой мелководный залив, краевые лагуны, отгороженные от главного бассейна косами, островами, а также зарождающимися антиклинальными складками. В аридном климате возникают кристаллизационные осадки: известняки, доломиты, иногда с целестином и флюоритом, ангидрит, гипс, каменная соль. Характерна серая, зеленовато-серая, темно-серая, желто-зеленая окраска. В результате сноса со смежных развивающихся поднятий в мелководном заливе могут откладываться красноцветы.

Литогенетический тип обломочных доломитов. Представлен доломитом серым, с обломками размером от 0.3 до 2.0 мм с содержанием до 40 %. Обломки угловатые, плохо окатанные. Встречаются в нижнекаратагатинской свите (Плещенко, Малахова, 1980).

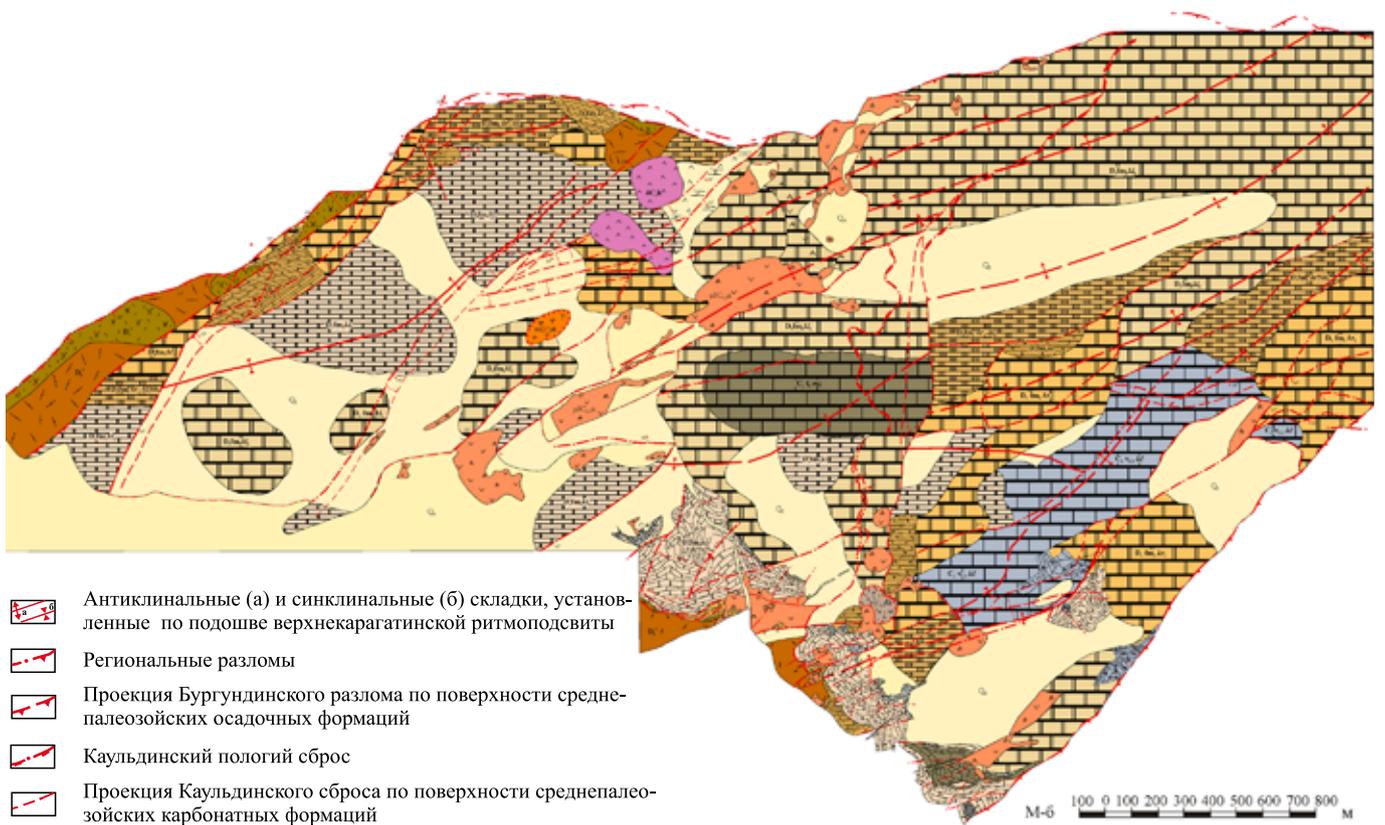
Литогенетический тип доломитов детритовых развит в верхнеумбетинской свите. Представляет собой доломиты с содержанием детрита криноидей, брахиопод, кораллов до 30—40 %, редко до 70 %. Размер детритовых обломков — от 0.1 до 0.6 мм, шлам (размер обломков фауны менее 0.1 мм) составляет иногда до 10 %. Обломки плохо окатаны, сложены микро- и мелкозернистым агрегатом доломита.

Мелкозаливная обломочная средняя подзона. Осадки этой подзоны располагаются главным образом в нижнекаратагатинской свите, имеют большое распространение. В средней обломочной подзоне выделяются несколько литогенетических типов пород. Фациальные комплексы расчленяются на фациальные единицы среднего порядка, называемые фациальными поясами, которые последовательно сменяют друг друга. В комплексе наземных поднятий последовательно сменяются: водораздельный алювиальный, склоновый, долинно-верный, линейно-долинный фациальные пояса. В подводно-равнинном комплексе сменяются: подводно-дельтовый, мелкозаливный, волноприбойный, рифогенный, донно-течениевый фациальные пояса, пояс мутьевых потоков, центрально-отстойный и подводно-элювиальный пояса (Плещенко, Малахова, 1980).

Таким образом, фациальные пояса выделяются по ведущему типу гидродинамики среды осадконакопления. Стадии поступательного динамического развития осадочных веществ разнообразны и закономерно сменяют друг друга на пути общего движения осадков. Водные потоки, сливаясь, образуют реку, текущую по равнине и впадающую в крупный водный бассейн (большое озеро, море). Далее осадки перемещаются

² Мундузова М. А. Золотоносность среднепалеозойских терригенно-карбонатных толщ Алмалыкского рудного района (Центральный блок): Дис. Ташкент, 2004. 24—25 с.

² Munduzova M. A. Gold content of the Middle Paleozoic terrigenous-carbonate strata of the Almalyk ore region (Central block): PhD thesis. Tashkent, 2004, pp. 24—25. (in Russian)



- Антиклинальные (а) и синклинальные (б) складки, установленные по подошве верхнекарагатинской ритмоподсвиты
- Региональные разломы
- Проекция Бургундинского разлома по поверхности среднепалеозойских осадочных формаций
- Каульдинский пологий сброс
- Проекция Каульдинского сброса по поверхности среднепалеозойских карбонатных формаций
- Крупные разломы в среднепалеозойских карбонатных формациях и их проекции по поверхности карбонатных формаций с амплитудой вертикального перемещения с опущенным (-) и приподнятым (+) блоками
- Разломы более мелкого порядка, тектонические трещины
- Контакты пород: а) прослеженные; б) предполагаемые
- Журловые лавы дацит-порфиров надакской свиты
- Журловые лавы андезитовых порфиров акчинской свиты
- Среднее-верхнее визе. Кульчулакская ритмосвита, установленная скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами
- Среднее-верхнее визе. Кульчулакская ритмосвита. Известняки серые, светло-серые, толсто- и среднеслоистые с кремнистыми линзами, закартированные на поверхности
- Нижнее турне. Мирзарабатская ритмосвита. Известняки толстослоистые, массивные, закартированные на поверхности
- Нижнее турне. Мирзарабатская ритмосвита, установленная скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами
- Верхний фамен. Кульятинская ритмосвита. Доломиты тонко- и среднеслоистые, ленточные, закартированные на поверхности
- Верхняя часть кульятинской ритмосвиты (верхнекульятинской ритмоподсвиты), установленная скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами
- Верхняя часть кульятинской ритмосвиты, интродуцированная кварцевыми порфировидными сиенит-диоритами и залегающая под верхнепалеозойскими эффузивами
- Верхняя часть кульятинской ритмосвиты, интродуцированная диоритами алмалыкского типа и залегающая под верхнепалеозойскими эффузивами
- Верхняя часть нижнекульятинской ритмосвиты, интродуцированная диоритами алмалыкского типа и залегающая под верхнепалеозойскими эффузивами

- Низы кульятинской ритмосвиты и верхи верхнекарагатинской ритмоподсвиты, залегающие под верхнепалеозойскими эффузивами
- Верхняя часть кульятинской ритмосвиты, установленная скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами
- Нижняя часть кульятинской ритмосвиты, установленная скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами
- Верхняя часть нижнекульятинской ритмосвиты (средняя часть кульятинской РС), установленная скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами
- Нижняя часть кульятинской ритмосвиты, интродуцированная диоритами Алмалыкского типа и залегающая под верхнепалеозойскими эффузивами
- Низы карагатинской ритмосвиты. Доломиты черные, темно-серые, массивные; в нижней части переслаивание доломитов, аргиллитов и песчаников. Закартирована на поверхности
- Верхнекарагатинская ритмоподсвита, установленная скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами; доломиты черные, массивные
- Нижний фамен Нижнекарагатинской ритмоподсвиты, установленной скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами. Тонкое переслаивание доломитов, аргиллитов с прослоями песчаников, редко ангидритов
- Фран. Алмалыкская ритмосвита, закартированная на поверхности. Переслаивание доломитов, известняков, аргиллитов с прослоями песчаников
- Диориты алмалыкского типа, установленные скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами
- Андезито-дацитовые порфиры и их туфы
- Кварцевые порфиры и их туфы
- Андезитовые порфиры
- Кварцевые порфировидные сиенито-диориты, закартированные на поверхности
- Кварцевые порфировидные сиенито-диориты, установленные скважинами под верхнепалеозойскими эффузивами

Рис. 3. Схема размещения среднепалеозойских осадочных формаций участка Абдулакан
 Fig. 3. Layout of Middle Paleozoic sedimentary formations at the Abdulakan site



к подводной дельте, выносятся в открытое море, подхватываются течениями и заканчивают свое движение в глубоких впадинах. Последовательно и закономерно сменяя друг друга, каждая динамическая стадия образует свой фациальный пояс.

Литогенетический тип алевролитов неслоистых и среднеслоистых характеризуется серо-зеленой, зеленой окраской, имеет известковистый, доломитовый цемент, содержит до 10–15 % обломков в основном кварца, песчаника, полевого шпата. Мощность прослоев от 0.1 до 2.0 м.

Литогенетический тип известняков доломитистых среднеслоистых встречается в нижнекаратагатинской ритмоподсвете в виде единичных прослоев. Это серый, темно-серый известняк с содержанием доломита до 20–30 %. Мощность прослоев от 0.1 до 1.9 м.

Литогенетический тип доломитов песчанистых тонкослоистых представляет собой темно-серые мелкозернистые породы с включением до 20–25 % песчаной фракции, сложенной в основном кварцем, реже полевыми шпатами. Мощность прослоев 0.3–0.7 м.

Мелкозаливная иловая зона располагается вслед за мелкозаливной обломочной зоной. Она протягивается широкой полосой вдоль обломочной зоны и часто размещается на территории всего мелкого залива. В ней выделяются две подзоны, последовательно располагающиеся друг за другом в сторону бассейна: верхняя и нижняя иловые подзоны.

Мелкозаливная иловая верхняя подзона. Осадки этой подзоны имеют наибольшее распространение среди отложений мелкозаливного фациального пояса. Они слагают большую часть живет-франской и фаменской толщ. Большое влияние на их формирование, особенно во время отложения нижнекаратагатинской свиты и алмалыкской ритмосвиты, оказывали сточные течения, приносившие терригенный материал в бассейн.

Породы, накапливавшиеся в иловой верхней подзоне, отличаются друг от друга гидродинамикой среды осадконакопления, геоморфологическими условиями. В каждой из фациальных зон происходит формирование одного или нескольких литогенетических типов пород, отличающихся друг от друга текстурными и структурными признаками, петрографическим и минералогическим составом, обусловленными различием фациальных условий области осадконакопления (Волков, Сидорова, 2016; Алексеев, 2014; Тугарова, Жуковская, 2019; Шишлов, 2010).

Отмельная фация представлена слоистыми доломитами, располагается либо на отмелях, либо вслед за обломочной фацией, либо на возвышенных местах отмелей в случае низкой энергии среды осадконакопления, недостаточной для образования обломочной зоны. Кроме того, она может примыкать к обломочной зоне, простирающейся вдоль берега материковой или островной серии. В ней формируются несколько литогенетических типов, среди них можно выделить типы среднеслоистых и толстослоистых доломитов и известняков.

Литогенетический тип среднеслоистых доломитов представлен доломитами серой, светло-серой и зеленоватой окраски, тонко- и мелкозернистыми, реже мелкозернистыми разностно, с редкой горизонтальной слоистостью. По напластованию редко отмечаются примазки или тонкие прослойки алеврита или пелита. Редко встречаются амфипоры, тонкостенные брахио-

поры, мелкие кораллы, строматопоры. Фауна выполнена микро- и тонкозернистым агрегатом доломита. Среднеслоистые доломиты преимущественно распространены в нижнекаратагатинской ритмоподсвете, кульятинской ритмосвите и редко в нижне- и верхнекаратагатинской ритмоподсветах.

Приотмельная фация. Располагается вслед за отмельной фацией в сторону бассейна с незначительными уклонами дна и более низкой энергией водной среды, часто занимает большие пространства, примыкая с одной стороны к отмельной фациальной зоне, а с другой — к более глубоководным межотмельным фациям. Выделяется один литогенетический тип среднеслоистых доломитов светло-серой, серой, зеленоватой-серой окраски, микро- и тонкозернистых. Для них характерна горизонтальная слоистость, ленточная слоистость, обусловленная полосками различной окраски. В отдельных прослоях имеются линзы песчаника и алеврита мощностью от 5 до 10 см, они встречаются в основном в кульятинской свите.

Межотмельная фация повышений дна широко распространена, являясь наиболее глубоководной фацией верхней подзоны. Дно, занимаемое межотмельными субфациями, неровное, с участками понижений и повышений.

Литогенетический тип тонкослоистых доломитов встречается в кураминской и кульятинской ритмосвитах. Представлен он доломитами светло-серой, зеленоватой-серой, реже желтоватой-серой окраски, тонко- и микрозернистыми, с характерной горизонтальной слоистостью. Иногда встречаются примазки алевритового или пелитового материала. Мощность слоев колеблется от — 1.0 до 2.9 м.

Межотмельная фация понижений дна занимает понижения, мелкие впадины в мелкозаливной иловой зоне. В фации понижений дна выделяется один литогенетический тип тонкослоистых, листовато-слоистых доломитов серой, светло-серой, темно-серой окраски, тонко- и микрозернистых. По напластованию отмечаются примазки зеленого, серо-зеленого арриллита.

Мелкозаливная иловая нижняя подзона. Осадки этой подзоны образовались в более застойных условиях, чем отложения предыдущей подзоны. Распространены они преимущественно среди фаменских отложений, реже встречаются в умбетской свите и относятся обычно к кровле пачек. На фациально-палеогеографических картах данная подзона выделяется как единая. Отмечены литогенетические типы среднеслоистых и тонкослоистых доломитов, которые имеют темно-серую, реже черную окраску, в основном микро- и тонкозернистую структуру.

Мелкозаливная застойная зона. Осадки застойной зоны мелководного залива распространены в верхах каратагатинских и кульятинских свит и почти целиком слагают верхнекаратагатинскую свиту. Выделяются следующие литогенетические типы: доломиты среднеслоистые, доломиты тонкослоистые, доломиты тонкослоистые с фауной. Доломиты имеют черную окраску, запах сероводорода, микро-, тонко- и мелкозернистые. Встречается тонкая горизонтальная слоистость. По напластованию иногда отмечаются примазки и тонкие прослойки черного арриллита. Отложения мелкозаливного фациального пояса входят в состав прибрежно-лагунной формации.



Волноприбойный фациальный пояс охватывает все участки дна водоема, в пределах которого основным способом движения является действие волн.

Волноприбойный пояс протягивается вдоль берегов всех водных бассейнов, за исключением участков, занятых дельтами и мелкими заливами, а также располагается на мелководных отмелях вдали от берега. Осадки волноприбойного пояса слагают полностью турнейско-средневизейскую толщу нижнего карбона, встречаются в джарбулакской, умбетинской и нижекаратагатинской свитах. Породы представлены доломитами, известняками, алевролитами, аргиллитами.

Прибойно-застойная зона. Осадки зоны редко встречаются в нижекаменноугольных отложениях, представлены темно-серыми, черными битуминозными, микро- и тонкозернистыми, тонко- и среднеслоистыми известняками мощностью 0.2—2.9 м.

Известняки волноприбойного фациального пояса входят в состав прибрежно-морской слоисто-карбонатной формации.

Динамическая палеогеография нижнего и среднего палеозоя

Динамическая палеогеография раннего силура

В начале раннего силура на территории района существовал морской бассейн, его центральная часть, где в застойных условиях происходило накопление пелитовых осадков путем оседания в пелитовой взвеси. Лишь временами в конце накопления нижней пачки ранне- и среднелландоверийской свиты располагалась авандельтовая отмельная часть подводной дельты с накоплением алевролитов.

В начале накопления верхней свиты произошло обмеление морского бассейна, подводная дельта и ее обломочная баровая подзона занимала всю территорию района, направление сноса было по азимуту 230—240° и 270° (в современных координатах). В течение накопления нижней пачки происходило ритмическое колебание морского дна. В периоды наибольшего погружения здесь располагался центрально-отстойный фациальный пояс с накоплением горизонтально-слоистых аргиллитов. В периоды поднятия дна существовала подводно-дельтовая отмельная подзона, реже подводно-дельтовая баровая подзона. В промежутке между ними действовали подводные течения, которые подхватывали терригенный материал, доставляемый подводными дельтами, и разносили его по всей акватории морского бассейна (Гунин, Тивинова, 1972³). Во время формирования средней пачки верхней свиты в районе располагалась глубоководная часть бассейна с накоплением темно-серых тонкогоризонтально-слоистых аргиллитов. Эпизодически действовали подводные течения, приносившие алевролитовый материал.

При формировании верхней пачки верхней свиты получили широкое развитие подводные течения, приносившие в бассейн терригенный алевролитовый материал (Ибламинов, 2019). В период отсутствия подводных течений в районе по-прежнему располагался

центрально-застойный фациальный пояс с иловой зоной и с накоплением серо-зеленых, зеленых горизонтально-слоистых аргиллитов.

Динамическая палеогеография среднего и позднего девона и раннего карбона

В течение среднего и позднего девона и раннекаменноугольного времени в восточной части Алма-лыкского рудного района располагался мелководный морской бассейн. В раннем живете во время формирования машрапской свиты здесь находилась подводная дельта крупной реки, стекавшая с поднятий, расположенных к северу и северо-востоку от исследуемого района. В это время здесь накапливались преимущественно подводно-дельтовые песчаные и пелитовые (глинистые) отложения (Старостин, 2021). Подводная дельта продолжала свое существование и в начале позднего живета, затем произошла трансгрессия морского бассейна в северном направлении. Всю территорию района в позднем живете занимал волноприбойный фациальный пояс, развитие которого началось с распространения прибойно-обломочной зоны, где осаждался детритовый и шламный материал. К концу живета она сменилась прибойно-иловой зоной с накоплениями хемогенных известняковых илов, а на отдельных мелких отмелях — с банками брахиопод, кораллов, криноидей. В конце позднего живета бассейн становится полуизолированным, с повышенной соленостью вод и в нем накапливаются иловые и доломитовые осадки мелководного залива (мелкозаливной зоны).

Почти на протяжении всего раннего франа во время формирования нижеджарбулакской свиты на территории района располагался мелкозаливный фациальный пояс с широким распространением застойной зоны мелководного залива (мелкозаливной зоны). Во время формирования нижней и средней части верхнеджарбулакской свиты в районе установился нормальный морской бассейн с богатой органической жизнью. К концу позднего живета в северной части района располагался мелкозаливный фациальный пояс, в южной части — волноприбойный (рис. 4, а, б).

В начале позднего фамена (начало времени формирования умбетинской свиты) всю территорию района занимал волноприбойный фациальный пояс и лишь в самой северной части по-прежнему находилась иловая зона мелководного залива (мелкозаливный пояс) (рис. 4, с, d). Южнее границы фациальных поясов находилась отмель зоны прибойя (прибойно-обломочная зона) шириной до 4 км.

В начале позднего фамена (начало формирования верхнекаратагатинской свиты) мелкозаливный фациальный пояс был распространен практически на всей территории района, возможно за исключением южной части, занятой в настоящее время интрузией гранодиоритов (рис. 5, а—d).

Во время накопления нижекаратагатинской свиты палеогеографическая обстановка была неустойчивой. В этих условиях происходило накопление тонко-

³ Гунин Е. В., Тивинова Г. П. Отчет о результатах поисков разведочных работ на участке Каракия // Фонды Ангреной геологоразведочной экспедиции. 1972. № 1. 1 отчет. 168 л.

³ Gunin E. V., Tivinova G. P. Report on the results of exploration work in the Karakiya area., Funds of the Angren Geological Exploration Expedition, 1972, No. 1, 1 report, 168 p. (in Russian)

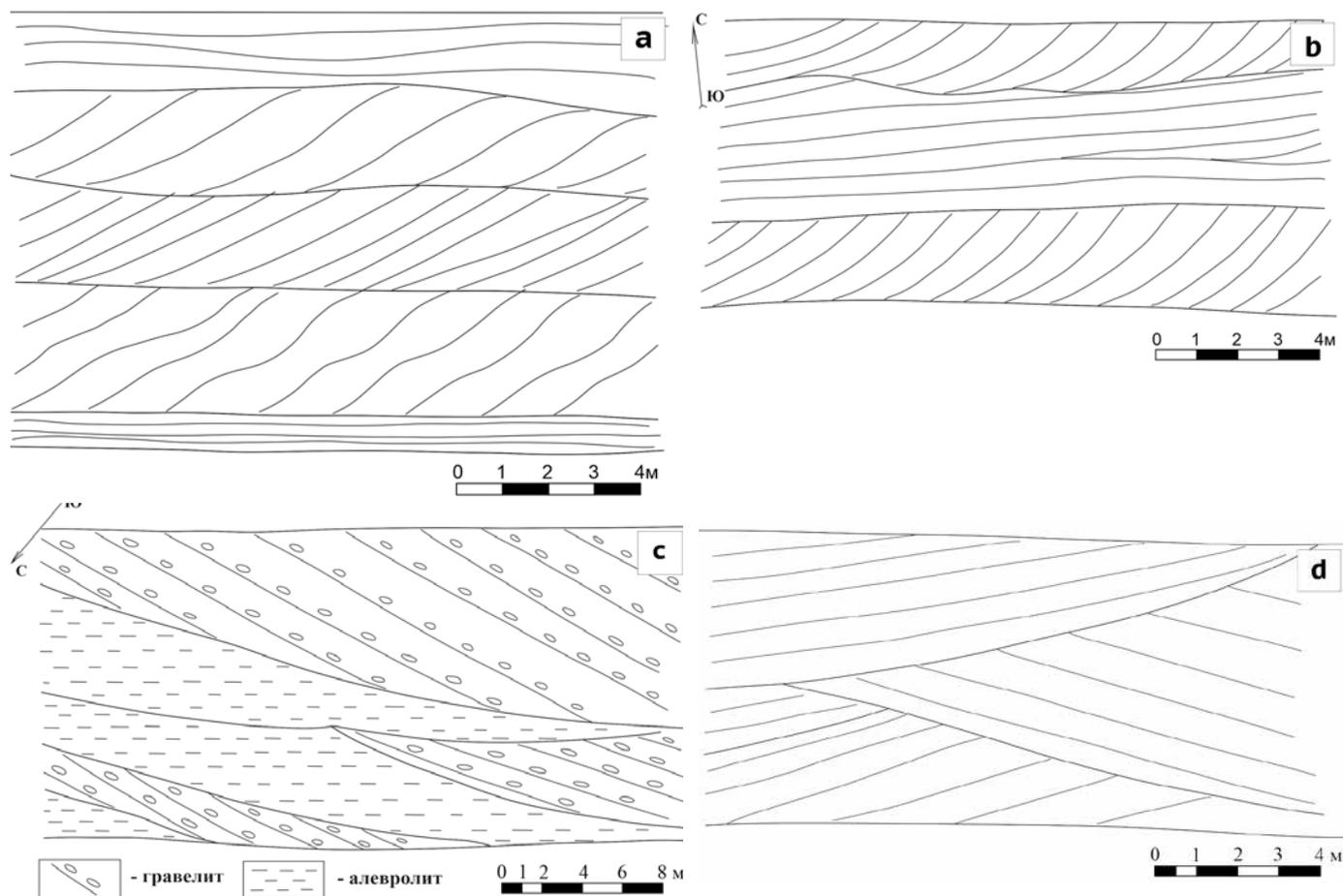


Рис. 4. Полевые зарисовки текстурных особенностей пород: а — многоярусная однонаправленная косая слойчатость в сланцах. Фация илов мелководной тиховодной впадины с действием донных течений (течениево-иловая) и застойной тиховодной лагуны (центрально-отстойной зоны). Разрез по Каратагате (профиль VI на рис. 1); б — мелкая косая однонаправленная слойчатость. Фация течениево-иловая. Разрез по Каратагате (профиль XXI на рис. 1); в — косая корытообразная слойчатость в линзах среднегравийных гравелитов и алевролитов. Фация подводно-дельтовая обломочная. Разрез по Каратагате (профиль XXII на рис. 1); д — косая перекрестная слойчатость в алевролитовом песчанике. Фация подводно-дельтовая обломочная. Разрез по Каратагате (профиль XXII на рис. 1)

Fig. 4. Field sketches of textural features of rocks: а — multi-tiered unidirectional cross-bedding in shales. The silt facies of a shallow, quiet-water depression with the action of bottom currents (current-silt) and a stagnant, quiet-water lagoon (central-silt zone). Section along Karatagata (profile VI in Fig. 1); б — fine oblique unidirectional lamination. The facies is flow-silt. Section along Karatagata (profile XXI in Fig. 1); в — oblique trough-shaped layering in lenses of medium-gravel gravelstones and siltstones. Submarine deltaic clastic facies. Section along Karatagata (profile XXII in Fig. 1); д — oblique cross-bedding in silty sandstone. Subaqueous deltaic clastic facies. Section along Karatagata (profile XXII in Fig. 1)

слоистых, часто переслаивающихся пород различной фациальной принадлежности. Граница между мелкозаливными и волноприбойными поясами часто далеко отодвигалась на юг. На территории изучаемого района располагался мелководно-заливный фациальный пояс с иловой и застойной зонами (мелкозаливная зона).

Южнее карбонатной гряды района Алтынтопкан располагалась мелководная (мелкозаливная) иловая зона шириной до 2–3 км. В этой полосе существовали небольшие отмели с накоплением обломочных пород (доломитов) в районе распространения отложений верхней подзоны (мелкозаливной обломочной зоны). Севернее иловой зоны существовала мелкозаливная застойная зона. Такая фациальная обстановка сохранялась непродолжительное время. Большую часть времени формирования верхнекаратагатинской свиты на всей площади района находилась застойная зо-

на мелководного залива (мелкозаливная обломочная зона) с накоплением черных битуминозных доломитов в восстановительной среде с сероводородным заряджением (Карбонатные..., 1982).

Во время отложения кулятинской ритмосвиты на площади Алмалыкского района и восточной части Алтынтопканского рудного района находился мелкозаливный фациальный пояс.

В начале отложения ритмосвиты располагалась мелкозаливная иловая верхняя подзона с накоплением светло-серых, серых, зеленовато-серых доломитов. Севернее в виде узкой полосы протягивалась мелкозаливная иловая нижняя подзона шириной 1–2 км с формированием в ней темно-серых доломитов. К северу от этой подзоны находилась застойная зона с накоплением черных доломитов (мелкозаливная застойная зона). Во время формирования кулятинской свиты на территории отдельных участков Алмалыкского

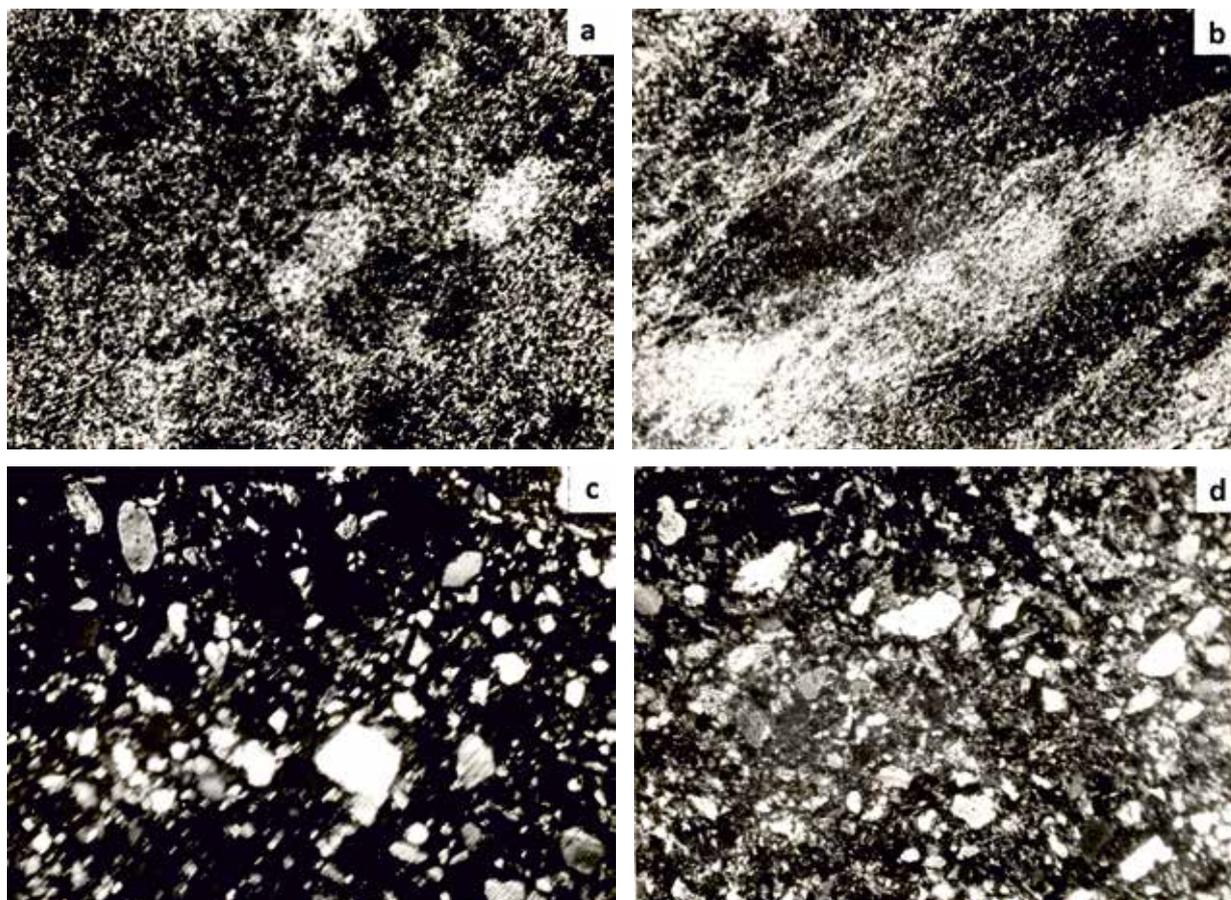


Рис. 5. Микрофотографии шлифов пород: а — сложная лепидобластовая структура в сланцах. Фация донно-течение-вая иловая; б — лепидобластовая структура в сланцах силура (Каратагата). Фация илов застойной тиховодной лагуны (центрально-отстойная иловая); с — песчаник мелкозернистый, алевролитовый. Фация подводно-дельтовая, обломочная подзона; д — песчаник алевролитовый. Фация подводно-дельтовая, обломочная подзона. Снимки сделаны при увел. 45, николи скрещены

Fig. 5. Microphotographs of rock sections: a — complex lepidoblastic structure in shales. The facies is bottom-flowing silty; b — lepidoblastic structure in Silurian shales (Karatagata). Central sedimentation silt facies; c — fine-grained sandstone, siltstone. Subaqueous deltaic facies, clastic subzone; d — siltstone sandstone. Subaqueous deltaic facies, clastic subzone. The images were 45x magnified, crossed nicols

района в верхах свиты существовала мелкозаливная застойная зона, в средней части — мелкозаливная иловая нижняя подзона, в нижней части — мелкозаливная иловая верхняя подзона с участием мелкозаливной обломочной зоны.

В турнейский и визейский века на территории всего района располагался морской бассейн с нормальной солёностью вод и с волноприбойным фациальным поясом.

Рудоносность осадочных формаций

В нижнесилурийских терригенных формациях рудоносность в рассеянном виде выявлена в нижней сардобской ритмоподсвете. Свита сложена в основном глинистыми породами с прослоями в верхней части донно-течение-вых и редко подводно-дельтовых алевролитов. По данным спектрального анализа, породы характеризуются повышенным содержанием золота, цинка, свинца, серебра, меди, сурьмы, мышьяка, кобальта, молибдена и др. Осадки сардобской ритмоподсветы прорываются дайками и штоками магматических пород кислого состава, реже среднего и основно-

го. Повышенные содержания элементов в доломитах и аргиллитах часто связаны с контактами или с магматическими телами вблизи контактов, с зонами тектонических нарушений в сланцах, с зонами окварцевания. Несмотря на то, что дайки, зоны тектонических нарушений и окварцевания развиты по всей ритмоподсвете, повышенные содержания рудных элементов химическим и спектральным анализами отнесены к двум частям ритмоподсветы: в основании и в кровле аргиллитов.

Нижний рудоносный горизонт включает раздробленные сланцы с содержанием меди — 0.1%, золота — 0.07 г/т, цинка — 0.02%, олова — 0.006%, серебра — 4.0 г/т; мощность интервала — 0,5м. Повышенные содержания рудных элементов характерны для осадочных формаций и только в одном случае для гранодиорит-порфиров. Зона с повышенными содержаниями располагается в низах рудоносной пачки в средней части гранодиорит-порфиров. Здесь на мощность 7.0 м содержание цинка составляет 0.1 %, свинца — 0.02 %, меди — 0.008 %, кадмия — 0.002 %. Над этой пачкой отмечаются горизонты с повышенным содержанием цинка в пределах 0.01—0.05 %, свинца 0.01—0.03 %, меди — 0.008 %, кадмия — 0.002 %.



меди 0.01–0.02 %, вольфрама — до 0.001 %, кобальта — до 0.001 %, молибдена — до 0.001 %, олова — до 0.001 %, золота — до 0.09 г/т, серебра — до 2 г/т. Повышенные содержания характерны для глинистых сланцев, реже для гранодиорит-порфиров. Пачка сложена донно-течениевыми аргиллитами.

Второй рудоносный горизонт отмечается в верхах кровли нижней кульятинской ритмоподсветы. Мощность обогащенной части рудными элементами — до 220.0 м. В осадочных породах повышенные содержания отмечаются на контакте с дайками, в зонах изменения, вызванных тектоническими нарушениями, в зонах окварцевания.

В начале рудоносного горизонта в слое алевролита, залегающем на гранодиорит-порфирах, мощностью 2.5 м, содержание цинка — до 0.15 %, свинца — 0.03 %, вольфрама 0.001 %. Выше залегает пачка алевролитов мощностью 24.5 м с повышенным содержанием цинка в пределах 0.03–0.07 %, сурьмы — 0.001–0.002 %, вольфрама — 0.001–0.003 %. В фациальном отношении повышенные содержания рудных элементов приурочены к алевролитам течениево-обломочной зоны и к аргиллитам центрально-отстойного фациального пояса. В зонах окварцевания рудоносной пачки отмечены высокие содержания меди, по данным спектрального анализа достигающие значения 0.5 %, серебра — до 0.2 г/т, повышенные содержания золота — до 0.04 г/т.

Еще одна рудоносная пачка мощностью 180 м выступает в нижней части верхней кульятинской ритмоподсветы, в 82.0 м от ее подошвы. В этой рудоносной пачке содержание меди достигает 0.02 %, свинца — 0.01–0.5 %, цинка — 0.01–0.4 %, сурьмы — 0.001–0.002 %, мышьяка — 0.04 %, вольфрама — 0.002 %, кобальта — 0.0015 %, молибдена — 0.0003 %, серебра — 10 г/т.

Обогащенными рудными элементами являются аргиллиты, сланцы глинистые, песчаники.

Таким образом, в отложениях нижнесилурийских терригенных формаций высокие содержания характерны для аргиллитов и сланцев тихоходного застойного (центрально-отстойного) фациального пояса и алевролитов зоны действия донных течений (донно-течениевого пояса).

Перспективными на золотое, свинцово-цинковое и редкометалльное оруденение являются нижняя и верхняя части нижней сардобской ритмоподсветы и средняя часть нижней пачки верхней кульятинской ритмоподсветы.

При изучении свинцово-цинкового оруденения девонских осадочных формаций было выяснено, что стратифицированные рудопроявления свинца и цинка приурочиваются к черным доломитам мелкозаливной застойной зоны и тяготеют в основном к верхам ритмопачек, ритмоподсвет и ритмосвит. По данным спектральных анализов, черные доломиты обогащены золотом, свинцом и цинком в несколько десятков, иногда и сотен раз выше по сравнению с доломитами, образовавшимися в мелкозаливной иловой и обломочной зонах мелкозаливного фациального пояса и по сравнению с известняками волноприбойного пояса. В отдельных горизонтах черных доломитов содержание свинца и цинка достигает до 0.07–0.1 %. Мощность рудоносных пачек достигает 37.0 м. Анализ послойных разрезов по девонским осадочным формациям и фа-

циально-палеогеографических карт, построенных по отдельным горизонтам, указывает на многократное и длительное существование мелкозаливной застойной зоны.

Выводы

Проведенные исследования литолого-фациальных нижнесилурийских и девонско-нижнекаменноугольных отложений позволили получить следующие результаты.

Среднепалеозойские терригенно-карбонатные формации входят в состав южно-тяньшанского ритмоподкомплекса, в состав позднеордовикско-ландоверийской ритмотолщи, в ранне- и среднеландоверийскую сардобскую ритмосвиту.

Девон-нижнекаменноугольные осадочные отложения относятся к срединно-тяньшанскому ритмоподкомплексу. Осадки сардобской ритмосвиты являются образованиями центрально-отстойного (тихоходного застойного), донно-течениевого (с действием донных течений) и подводно-дельтового (авандельтового) фациальных поясов. Отложения машрабской ритмосвиты являются осадками подводно-дельтового пояса, а вышележащие девон-нижнекаменноугольные отложения — осадками волноприбойного мелкозаливного, реже донно-течениевого поясов.

В нижнесилурийской сардобской свите распространены удаленная (дистальная) морская пелитовая формация, морская псаммито-пелитовая формация и шлировая (псаммитовая) формация. Девон-нижнекаменноугольными осадочными формациями являются прибрежно-морская слоисто-карбонатная, прибрежно-лагунная слоисто-карбонатная и шлировая.

В раннесилурийское время на территории района располагалась морская бассейн с тихоходными и застойными условиями (центрально-отстойный фациальный пояс), с периодическими существующими донными течениями, имеющими западное, северо-западное направления. В отдельные периоды здесь располагалась подводная дельта с обломочными и отмельными фациальными подзонами (Попов, 1958). Во время формирования раннеживетской машрабской свиты на территории Алмалыкского района находилась подводная дельта крупной реки с направлением течений на юго-запад (в современных координатах). Во время формирования средне- и верхнедевонских отложений в начале ритмов происходила трансгрессия морского бассейна с нормальной солёностью вод, с существованием на отмелях прибойно-обломочной зоны, в межотмельных понижениях — прибойно-иловой и застойной зон. К концу ритмов происходило засоление бассейна и он превращался в изолированный и полуизолированный водные бассейны типа лагуны с широким распространением застойных зон, занимающих понижения дна бассейна с восстановительными условиями и с сероводородным заражением. Длительное время такой бассейн существовал в позднем фамене во время накопления верхнекаратагатинской и кульятинской свит. В раннем карбоне произошла трансгрессия морского бассейна с нормальной солёностью вод, просуществовавшего весь ранний карбон на территории района и сопредельных площадях. И в это же время, возможно одновременно с осадконакоплением (сингенетично), в бассейнах происходило и нако-



пление мелких (дисперсных) металлов, которые под воздействием вулканической деятельности, выраженной гидротермальными процессами (эпигенетически), были переотложены в зонах окварцевания, ожелезнения, дробления, хлоритизации и др.

Литература / References

- Алексеев В. П.* Атлас субакульных фаций нижнемеловых отложений Западной Сибири (ХМАО-Югра). Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. 284 с.
 Alekseev V. P. Atlas of subaqueous facies of the Lower Cretaceous deposits of Western Siberia (KhMAO-Yugra). Ekaterinburg: USMU Publishing House, 2014, 284 p. (in Russian)
- Волков А. В., Галямов А. Л.* Геофизическая модель земной коры, геодинамические обстановки, перспективы открытия месторождений золота карлинского типа в арктической зоне Республики Саха (Якутия) // Арктика: Экология и экономика. 2020. № 1. С. 86–87.
 Volkov A. V., Galyamov A. L. Geophysical model of the earth's crust, geodynamic conditions, prospects for the discovery of Carlin-type gold deposits in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). Arctic: Ecology and Economics, No. 1, 2020, pp. 86–87. (in Russian)
- Волков А. В., Сидорова А. А.* Геолого-генетическая модель месторождения золота карлинского типа // Литосфера. 2016. № 6. С. 89–96.
 Volkov A. V., Sidorova A. A. Geological and genetic model of the Carlin type gold deposit. Lithosphere, 2016, No. 6, pp. 89–96. (in Russian)
- Голованов И. М.* Меднорудные формации Западного Тянь-Шаня. Ташкент: Фан, 1978. С. 15–28.
 Golovanov I. M. Copper ore formations of the Western Tien Shan. Tashkent: Fan, 1978, pp. 15–28. (in Russian)
- Ибламинов Р. Г.* Геология и генезис месторождений эндогенной серии. Пермь, 2019. 232 с.
 Iblaminov R. G., Geology and Genesis of Endogenous Series Deposits. Perm, 2019, 232 p. (in Russian)
- Карбонатные, силицитовые и удаленные пелитовые формации Средней Азии // Генетические типы и этапы образования свинцово-цинкового оруденения в Алмалыкском рудном районе: Сб. науч. тр. 1982. № 678. С. 273–274.
 Carbonate, silicite and remote pelitic formations of Central Asia. Collection of scientific papers Genetic types and stages of formation of lead-zinc mineralization in the Almalyk ore region, 1982, 678, pp. 273–274. (in Russian)*
- Плещенко И. В., Малахова Н. А.* Детальное литолого-фациальное изучение рудовмещающих карбонатных формаций (D2-C1) северо-западной части Центрального блока и сопредельных районов. Ташкент, 1980, 170 с.
 Pleschenko I. V., Malakhova N. A. Detailed lithologic-facies study of ore-bearing carbonate formations (D2-C1) of the northwestern part of the Central block and adjacent areas. Tashkent, 1980, 170 p. (in Russian)
- Плещенко И. В., Мирзаев А. У., Кушаков А. Р., Булина В. Р., Илхамов Г. Х.* Месторождения и рудопроявления свинца и цинка в девонских формациях Западного Тянь-Шаня // Основные проблемы магматической геологии Западного Тянь-Шаня: Материалы республ. науч. конф., посвящ. пам. акад. Т. Н. Далимова. Ташкент, 2012. С. 62–65.
 Pleschenko I. V., Mirzaev A. U., Kushakov A. R., Bulina V. R., Ilkhamov G. Kh. Deposits and ore occurrences of lead and zinc in the Devonian formations of the Western Tien Shan. Main problems of igneous geology of the Western Tien Shan. Proc. of the Republican scientific conference dedicated to the memory of Academician T. N. Dalimov. Tashkent, 2012, pp. 62–65. (in Russian)
- Попов В. И.* История депрессий и поднятий Западного Тянь-Шаня. Ташкент, 1958. 135 с.
 Popov V. I. History of depressions and uplifts of the Western Tien Shan. Tashkent, 1958, 135 p. (in Russian)
- Попов В. И.* Динамический принцип фациального анализа осадочных формаций. Физические и химические процессы и фации. М.: Наука, 1947. С. 169–172.
 Popov V. I. Dynamic principle of facies analysis of sedimentary formations. Physical and chemical processes and facies. Moscow: Nauka, pp. 169–172. (in Russian)
- Попов В. И., Макарова С. Д., Филиппов А. А.* Руководство по определению и методика фациально-палеогеографического картирования. М.: Гостоптехиздат, 1963.
 Popov V. I., Makarova S. D., Filippov A. A. Guide to the definition and methodology of facies-paleogeographic mapping, Moscow: Gostoptekhizdat, 1963. (in Russian)
- Попов В. И., Плещенко И. В., Панин В. И.* К методике изучения стратиформных свинцово-цинковых месторождений. Процессы осадочно- и вулканогенно-осадочного накопления цветных металлов. Новосибирск: Наука, 1980. С. 102–108.
 Popov V. I., Pleschenko I. V., Panin V. I. Towards a methodology for studying stratiform lead-zinc deposits. Processes of sedimentary and volcanogenic-sedimentary accumulation of non-ferrous metals. Novosibirsk: Nauka, 1980, pp. 102–108. (in Russian)
- Старостин В. И.* Металлогения: Учебник. М., 2021. С. 5–6.
 Starostin V. I. Metallogeny. Textbook. Moscow, 2021, pp. 5–6. (in Russian)
- Тугарова М. А., Жуковская Е. А.* Атлас типовых фаций. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2019. 142 с.
 Tugarova M. A., Zhukovskaya E. A. Atlas of typical facies. Izhevsk: Institute of Computer Research, 2019, 142 p. (in Russian)
- Шишлов С. Б.* Структурно-генетический анализ осадочных формаций. СПб.: С.-Петербург. горный институт, 2010. 276 с.
 Shishlov S. B. Structural and genetic analysis of sedimentary formations. St. Petersburg: St. Petersburg Mining Institute, 2010, 276 p. (in Russian)
- Barber J. A.* Minerals exploration statistics for years 1980, 1981, And 1982 // Econ. Geology. 1984. Vol. 79. No. 7. Pp. 1768–1773.
- Rye R. O.* A model for formation of carbonate-hosted disseminated gold deposits based on geologic, fluid-inclusion geochemical and stable isotope studies of the Carlin and Cortez deposits, Nevada. US. geol. surv. bull., 1985, No. 1646. 24–25 p.



Влияние факторов водной среды на минерализацию цианобактерий и зеленых водорослей (Республика Коми)

Т. П. Митюшева¹, В. И. Каткова¹, **В. Н. Филиппов¹**, Е. М. Тропников¹, Е. Н. Патова²

¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, mityusheva@geo.komisc.ru, katkova@geo.komisc.ru

² Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, patova@ib.komisc.ru

В работе приведена характеристика кристаллических образований, формирующихся во внеклеточном полимерном веществе колониальных слизистых чехлов фототрофных микроорганизмов, обитающих на поверхности погруженных субстратов в водах рек бассейна Северной Двины на юге Республики Коми. Исследована минерализация колоний цианобактерий *Gloeotrichia* sp. и зеленой водоросли *Chaetophora elegans*. Эти микроорганизмы обитают в речных водах трех гидрохимических типов: гидрокарбонатных магниево-кальциевых – типичных для зоны тайги умеренно континентального климата; гидрокарбонатно-сульфатных магниево-кальциевых и техногенно загрязненных хлоридно-натриевых. На примере ультрапресных – солоноватых (0.2–2.8 г/дм³) вод показано, что геохимия водной среды является одним из наиболее важных факторов, влияющих на процесс биоминералообразования. Методами рентгеновской дифрактометрии, электронной микроскопии, микрозондового анализа и ИК-спектроскопии в высушенных образцах микроорганизмов установлены кальцит, фатерит, кварц и галит. Представлены морфологические особенности микроминералов. Кристаллы и агрегаты карбоната кальция формируются в пределах экзогенных слизистых образований колоний водорослей и цианобактерий. Изотопный состав углерода карбонатов ($\delta^{13}\text{C}$ –7.5 и –3.8 ‰ PDB) указывает на их биогенную природу. Образование минеральных фаз, морфологические особенности кристаллов и степень биоминерализации колоний микроорганизмов обусловлены и физико-химическими параметрами водной среды. Оценены возможности хемогенного карбонатообразования.

Ключевые слова: химический состав вод, водоросли, цианобактерии, минералообразование, карбонат кальция, Республика Коми

Influence of aquatic environmental factors on mineralisation of cyanobacteria and green algae (Komi Republic)

T. P. Mityusheva¹, V. I. Katkova¹, **V. N. Filippov¹**, E. M. Tropnikov¹, E. N. Patova²

¹ Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

² Institute of Biology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

This article describes crystallization formed in the exogenous mucous sheath of phototrophic microorganisms living in the surface waters of the south area of the Komi Republic. The mineralization of colonies of cyanobacteria of the *Gloeotrichia* sp. and green algae *Chaetophora elegans* was studied. The waters of rivers in the Northern Dvina basin have been studied as habitats for the microorganisms. They have a different composition: HCO_3 Ca–Mg, typical for the taiga zone of a temperate continental climate; SO_4 – HCO_3 Ca–Mg and Cl–Na (in the zone of technogenic pollution). Using the example of these neutral – weakly alkaline ultrafresh – salty (0.2–2.8 g/L) waters, it is shown that the geochemistry of the aquatic environment is one of the most important factors influencing the minerogenesis. Calcite, vaterite, quartz and halite were identified in dried colonies of microorganisms within the extracellular polymeric substance using the methods of X-ray diffractometry, electron microscopy, microprobe analysis and IR spectroscopy. The morphological features of microminerals are presented depending on the type of microorganisms. Calcium carbonate crystals and aggregates are formed within the exogenous mucous sheath of algae and cyanophytes. The carbon isotope composition of carbonates ($\delta^{13}\text{C}$ –7.5 and –3.8 ‰ PDB) indicates their organic nature. The formation of minerals, morphological features of crystals and the degree of biomineralisation of colonies of phototrophic microorganisms are conditioned by the physicochemical parameters of the aquatic environment. The possibilities of chemogenic precipitation of carbonates from the studied natural waters were assessed.

Keywords: chemical composition of water, algae, cyanobacteria, minerogenesis, calcium carbonate, Komi Republic

Введение

Фоссилизированные и живые цианобактерии и водоросли как объекты изучения привлекают внимание биологов и экологов, минералогов и других исследователей в связи с решением целого ряда научных и прикладных задач, включая био-, геотехнологии и др. Исследование современного минералообразования с участием эукариотических и прокариотических мик-

роорганизмов имеет большое значение для понимания вопросов генезиса осадочных пород и связанных с ними полезных ископаемых. В процессе метаболизма водоросли и цианобактерии могут формировать различные биоминералы, их состав отражает состояние среды обитания и влияние антропогенных воздействий, что позволяет использовать их в экологических и палеоклиматических изысканиях.

Для цитирования: Митюшева Т. П., Каткова В. И., Филиппов В. Н., Тропников Е. М., Патова Е. Н. Влияние факторов водной среды рек на минерализацию цианобактерий и зеленых водорослей (Республика Коми) // Вестник геонаук. 2024. 2 (350). С. 30–37. DOI: 10.19110/geov.2024.2.3

For citation: Mityusheva T. P., Katkova V. I., Filippov V. N., Tropnikov E. M., Patova E. N. Influence of fluvial aquatic environmental factors on mineralisation of cyanobacteria and green algae (Komi Republic). Vestnik of Geosciences, 2024, 2 (350), pp. 30–37, doi: 10.19110/geov.2024.2.3



Первые исследования биолитогеоза, проводимые с XIX века, были посвящены выявлению связей бактерий, водорослей и образований кристаллов углекислого кальция (Исаенко, 1948). За прошедший период было установлено более 300 минералов, способных образоваться в процессе биоминерализации в различных природных средах (Dittrich, Obst, 2004; Dupraz, et al., 2011; Самылина и др., 2022 и др.). Ряд микроорганизмов (бактерии и водоросли) в результате метаболической деятельности производят минеральные соединения внутриклеточно и внеклеточно (Konishi et al. 2006; Dupraz, et al., 2009; Yoshida et al., 2010; Phillips et al., 2013; Dhami et al., 2013).

Биогеохимический процесс осаждения карбоната кальция (CaCO_3) цианобактериями широко распространен и изучен (Pentecost, Riding 1986; Заварзин, 2002; Obst, Dittrich, 2006 и др.). Установлено, что карбонат кальция может быть осажден в трех кристаллических полиморфных формах: кальците и арагоните, в меньшей степени фатерите (ватерите). Инкрустация цианобактерий кальцитом часто наблюдается в морских, солоноватых и в меньшей степени пресных водах (Rivadeneira, 1994; Билан, Усов, 2001; Ehrlich, 2010; Kamennaya et al., 2012; Цыренова и др., 2018; Самылина и др., 2022 и др.). Считается, что механизм процесса кальцификации цианобактерий, независимо от их местообитания и экологических условий, сходен и возникает как результат изменения карбонатного равновесия. Исследования (Герасименко и др., 2004; Карпов и др., 2016; Цыренова и др., 2018 и др.) показали роль цианобактерий в осаждении оксида кремния, фосфатов.

Ранее в результате проведенных исследований водорослей из водоемов Республики Коми было установлено, что основным минералом, формирующимся в экзополисахариде (гликокаликсе) цианобактерий из рода Ривулярия (*Rivularia*) руч. Богадельского (с. Серегово), является кальцит (Каткова и др., 2017). Отложение карбоната кальция происходит на поверхности чехлов в виде облекания нитей цианобактерий, их отпечатков и полных псевдоморфоз. В образцах высушенных колоний в качестве примесных минералов структурными методами были определены: *галит* (NaCl), *карналлит* ($\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), *бассанит* ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) и *кварц* (SiO_2). Исследования цианобактерий *Gloeotrichia* sp. порядка ностокальных, обитающих в ультрапресных водах озер Вадкерос и Сейты, показали присутствие в их слизистых чехлах зерен кварца (Каткова и др., 2019). Кварц

и зерна полевых шпатов (микроклин и альбит), зафиксированные в качестве примесных минералов, могут иметь как аллотипное, так и, вероятно, аутигенное происхождение. В этих водоемах с малыми содержаниями химических элементов зафиксированы на поверхности клеток цианобактерий уэвеллит и полифосфаты. Анализ РЭМ-изображений показал, что формирование биоминералов (кварца, кальцита, уэвеллита и др.), независимо от условий кристаллизации, происходит в пределах слизистых чехлов, а не в структуре клеток.

Исследования процессов накопления биоминералов цианобактериями и другими водорослями в связи со слабой изученностью данного сложного процесса в пресных и соленых континентальных водоемах были продолжены. Целью работы является оценка влияния состава водной среды на особенности состава и структуры микроминералов, формирующихся в фототрофных микроорганизмах, которые обитают в водах рек бассейна Северной Двины в южной части Республики Коми.

Фактический материал

Объекты исследований — это нативные и высушенные формы минерализованных колоний различных фототрофных микроорганизмов. Отбор проб произведен в июле — августе 2021 г. Цианобактерии и зеленые водоросли отбирали в пластиковые контейнеры вместе с водой из этого же водоема и в тот же день исследовали. После промывания их дистиллированной водой часть колоний помещали в чашки Петри для высушивания, часть фиксировали для дальнейшего изучения. После извлечения образцов из водной среды в лабораторных условиях в связи с резкой сменой физико-химических условий в течение двух-трех часов (до суток) происходит кристаллизация колоний.

Одновременно проведен отбор речных вод в местах обитания водорослей. Отбор проб воды осуществлялся в пластиковые контейнеры объемом 0.5 л, для определения микроэлементного состава — в пробирки из пропилена 10—15 мл после фильтрования (фильтр 0.45 μ). Координаты точек отбора микроорганизмов и вод приведены в таблице 1.

Цианобактерии рода Глеотрихия (*Gloeotrichia* sp.) собраны в р. Вымь (обр. 21-90) в районе с. Серегово. Они образуют студенистые плотные шаровидные колонии, прикрепленные к водным растениям или сво-

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Table 1. Characteristics of research objects

Объект исследования Object of study	№ образца Sample No.	Размер колоний, см Size of colonies, cm	Наименование водоема Name of reservoir	№ пробы воды Water sample No.	Географическое местоположение объекта Geographical location of the object	
					координаты / coordinates	
					долгота / longitude, E	широта / latitude, N
Глеотрихия (<i>Gloeotrichia</i> sp.)	21-90	0.1—3.0	р. Вымь Vym river	21-90в	62°19'57.0"	50°42'33.2"
Хетофора изящная (<i>Chaetophora elegans</i> (Roth) C. Agardh)	21-95	0.2—0.7	руч. Богадельский Bogadelsky stream	21-95в	62°19'58.3"	50°42'25.1"
Глеотрихия (<i>Gloeotrichia</i> sp.)	21-70	0.1—0.6	р. Луза Luza river	21-70в	60°31'48.9"	48°47'02.0"

бодно плавающие среди зарослей. Цвет образцов темно-зеленый или грязно-зеленый, размер различен и достигает 3 см. Образцы собраны у правого берега р. Вымь, глубина отбора 0.2–0.5 м. Проба воды 21–90в отобрана в месте обитания колоний водорослей. Река Вымь — крупный правый приток р. Вычегды (бассейн Северной Двины). Ширина реки более 100 м, глубина отбора пробы у правого берега — 0.4 м.

Зеленые водоросли (обр. 21–95) Хетофора изящная (*Chaetophora elegans*) отобраны из руч. Богадельский (с. Серегово). Талломы представляют собой закрепленные на субстрате студенистые шаровидные полупрозрачные колонии изумрудно-зеленого цвета размером до 10 мм. Глубина отбора водорослей — 0.05–0.15 см. Соответственно, отобрана проба воды 21–95в из руч. Богадельского (небольшой правый приток р. Вымь в с. Серегово). Ручей с антропогенно измененным руслом шириной не более 1 м и глубиной до 0.3 м протекает вблизи недействующего Сереговского солеваренного завода.

Колонии цианобактерий рода Глеотрихия (обр. 21–70) темно-зеленого и бутылочно-зеленого цвета размером до 6 мм, прикрепленные и свободноплавающие, извлечены из р. Лузы у с. Лойма. В месте их обитания отобрана проба воды 21–70в с глубины 0.3 м из левобережной части реки. Река Луза в данном районе имеет ширину до 100 м и является правым притоком р. Юг (левый приток р. Северная Двина).

Методы исследований

Исследования минерализованных форм колоний фототрофных микроорганизмов проведены в Центре коллективного пользования УрО РАН «Геонаука» в ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар) оптическими (МБС-10 и световой микроскоп Motic BA 300), рентгеноструктурным и ИК-спектроскопическим (фурье-спектрометр ИнфраЛюм ФТ-02) методами. Фазовый состав образца определялся по дифрактограммам неориентированных образцов, съемка проводилась на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-6000, излучение $\text{CuK}\alpha$, Ni-фильтр, 30 kV, 20 mA, область сканирования $2-5^\circ 2\theta$. В связи с малыми размерами объектов исследований для каждого метода и анализа были использованы разные колонии. Объектами для изучения морфологии кристаллов и минерального состава послужили высушенные образцы колоний микроорганизмов. С целью получения изображений методами электронной микроскопии и элементного анализа с использованием рентгеноспектрального микрозондового анализа (JSM-6400 Jeol и Tescan Vega3 LMN с энергодисперсионной приставкой X-max50) образцы предварительно напыляли углеродом.

Измерения изотопного состава углерода карбонатных образований выполнены в ЦКП «Геонаука» в режиме непрерывного потока гелия (метод CF-IRMS) на изотопном масс-спектрометре Finnigan Delta V Advantage, ThermoFisher Scientific (Бремен, Германия). Калибровка осуществлялась по международному стандарту NBS 18 и NBS 19, ошибка определения ($\delta^{13}\text{C} \pm 0.15$)‰ (1 σ).

В полевых условиях температуру, pH и удельную электропроводность поверхностных вод измеряли тестером HI 98130 (Hanna Instruments, Португалия).

Макрокомпонентный состав вод проанализирован в экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар) в соответствии с аттестованными методиками. Концентрации ионов HCO_3^- , Cl^- определены методом потенциометрического титрования; SO_4^{2-} — турбидиметрическим, NH_4^+ и NO_3^- — фотометрическими методами; Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Si — на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Spectro CIROS CCD (Германия).

Результаты и обсуждение исследований

Химический состав речных вод приведен в таблице 2. Наименьшее количество растворенных солей содержится в водах р. Лузы (проба 21–70в), максимальное — в руч. Богадельском (проба 21–95в). Воды рек относятся к трем различным гидрохимическим типам, что отражает приведенные в таблице формулы солевого состава вод.

Колонии цианобактерий *Gleotrichia* sp. выявлены в рр. Лузе и Выми. Воды р. Лузы (проба 21–70в) ультрапресные (минерализация 0.2 г/дм³), слабощелочные (pH 7.7), гидрокарбонатные магниевые-кальциевые. Такой состав поверхностных вод типичен для большей части территории Республики Коми.

Воды реки Выми (проба 21–90в) пресные (минерализация 0.3 г/дм³), нейтральные по величине pH, с гидрокарбонатно-сульфатным магниевым-кальциевым составом. Это связано с наличием на водосборной площади пермских терригенных, карбонатных и сульфатных пород, растворение и выщелачивание которых приводит к повышению содержания сульфат-иона и кальция в составе вод.

Воды в руч. Богадельском (проба 21–95в), в котором выявлены колонии зеленых водорослей *Chaetophora*, а ранее цианобактерии *Rivularia* (Каткова и др., 2017), солоноватые (минерализация 2.8 г/дм³), хлоридно-натриевые, слабощелочные. Такой необычный для поверхностных вод химический состав обусловлен тем, что в площадь водосбора ручья входит техногенно измененная территория, сложенная в основном шлаками углей и отходами Сереговского сользавода. В ручей также поступают стоки минерализованных вод из естественных источников и самоизливающихся скважин (Митюшева, 2017). Воды р. Выми и руч. Богадельского, отобранные в районе с. Серегово, несмотря на близость мест отбора проб — около 300 м, значительно отличаются по анионному и катионному составу, солесодержанию (табл. 2).

Строение, состав и структуры микроминералов. Исследования структурными методами нескольких высушенных форм колоний цианобактерий *Gleotrichia* sp. из р. Выми (обр. 21–90) показали, что минеральной составляющей во всех образцах является кальцит (CaCO_3). Экстремумы на рентгеновских дифрактограммах (3.85; 3.04; 2.49; 2.28; 2.18; 2.09; 1.91; 1.87; 1.60; 1.52 Å) указывают на мономинеральный состав этих кристаллических образований. На ИК-спектрах кроме полос, характерных для кальцита (713, 874 и 1427 cm^{-1}), зафиксированы слабые пики дублета в области 780–800 cm^{-1} (колебания связанных SiO_4 -тетраэдров) и полоса 1080 cm^{-1} , которые свидетельствуют о присутствии микроминеральных примесей кварца. Широкая поло-



Таблица 2. Физико-химическая характеристика поверхностных вод
Table 2. Physical and chemical characteristics of surface waters

Параметры Parameters	№ пробы / Sample No.		
	21-70в	21-90в	21-95в
pH	7.7	7.3	7.8
Температура / Temperature, °C	21.5	20.8	19.5
Минерализация, мг/дм ³ Mineralisation, ppm	198.2	329.1	2762.0
Na ⁺ , мг/дм ³	7.1	6.1	510.0
NH ₄ ⁺	< 0.01	—	< 0.01
K ⁺	1.1	0.4	30.0
Ca ²⁺	32.0	65.5	230.0
Mg ²⁺	6.8	11.9	67.0
Cl ⁻	2.0	2.0	1334.0
SO ₄ ²⁻	4.2	124.2	171.0
HCO ₃ ⁻	145.0	119	420.0
NO ₃ ⁻	0.1	—	< 0.01
H ₂ SiO ₃	20.7	3.9	23.1
CO ₂ расч	5.98	15.27	10.70
Карбонатная щелочность (mHCO ₃ ⁻ + 2mCO ₃ ²⁻) Carbonate alkalinity	2.38	1.95	6.88
2mCa ⁺ /(mHCO ₃ ⁻ + 2mCO ₃ ²⁻)	0.67	1.68	1.67
Формула солевого состава воды The formula of the salt composition of water	$M_{0.2} \frac{HCO_3 94 SO_4 3 Cl 2}{Ca 47 Mg 33 Na 18}$	$M_{0.33} \frac{SO_4 56 HCO_3 42 Cl 1}{Ca 56 Mg 34 Na 9}$	$M_{2.76} \frac{Cl 178 HCO_3 14 SO_4 7}{Na 65 Ca 17 Mg 16}$

Примечание: m — молярная концентрация, мг-экв/дм³.

Note: m — molar concentration, mol/L.

са ИК-поглощения в области 565—604 см⁻¹, обусловленная колебаниями связей в ортофосфорных группировках, указывает на разупорядочение фосфатной компоненты в структуре колоний.

Микрозондовым анализом и методом РЭМ в слизистых чехлах колоний цианобактерий диагностируется кальцит с содержанием Са до 34 мас. %. На электронно-микроскопических изображениях минерализованных колоний визуализируются множество монокристаллов и сростков, различающихся по морфологии. Наряду с минерализованными формами среди кристаллических образований выявляются отдельные хорошо сохранившиеся особи *Глеотрихии*, а также створки диатомовых водорослей.

Агрегаты кальцита на поверхности и внутри экзополисахаридного вещества достигают 250 мкм (рис. 1, а, б). Кальцит формирует как вершинные скелетные кристаллы, так и образования ромбоэдрического облика с субиндивидами по всей поверхности. Отдельные скопления кальцита, определяемые на изображениях как бесструктурные массы, содержат в себе минерализованные чехлы цианобактерий.

На микроснимках четко визуализируются валютинные гранулы в цитоплазме клеток, содержащие фосфат кальция (рис. 2). Концентрация фосфора в отдель-

ных случаях достигает 2.18 мас. %, а кальция — 8.86 (табл. 3).

Установлено, что фазовый состав высушенных колоний зеленых водорослей *Chaetophora elegans* (обр. 21-95) из руч. Богдельского, согласно рентгеновской дифрактограмме, соответствует кальциту. В качестве примесных минералов идентифицированы *кварц*, *галит* и *фатерит*.

Кальцит формирует как сростки, микрзернистые структуры, так и скелетные кристаллы вершинно-реберного типа с параллельными субиндивидами по всей поверхности (рис. 3). Содержание кальция в них, по данным микрозондового анализа, колеблется в пределах 39—50 мас. %.

Кроме кальцита на рентгеновских дифрактограммах исследованного образца 21-95 зафиксированы экстремумы $d(\text{Å})$ 4.26; 3.56; 3.29; 2.73; 2.06, соответствующие фатериту. Биоминерал фатерит (ватерит), редко обнаруживаемый в природе, является одной из полиморфных модификаций карбоната (CaCO₃). Экспериментально установлено, что предшествующим этой метастабильной фазы является аморфный карбонат кальция. Дальнейшее его растворение-восстановление превращает фатерит в кальцит (Qiang Shen et al., 2006). На микроснимках фатерит, сформир-

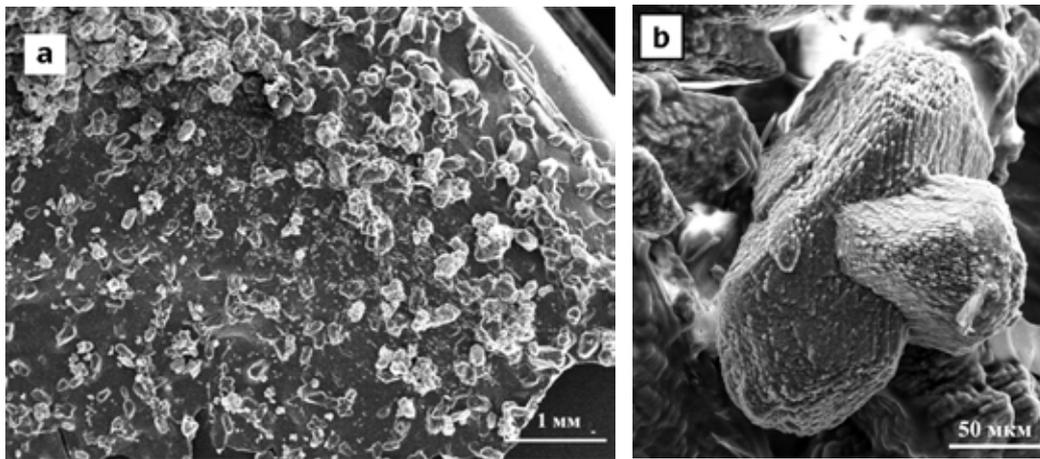


Рис. 1. Минерализованная колония цианобактерии Глеотрихия (обр. 21-90): а — общий вид; б — сросток кристаллов кальцита. СЭМ-снимки сделаны на JSM-6400 JEOL и Tescan Vega 3 LMH

Fig. 1. Mineralized colony of cyanobacteria *Gleotrichia* (sample 21-90): a — general view; b — intergrowth of calcite crystals. SEM pictures were taken by JSM-6400 JEOL and Tescan Vega 3 LMH

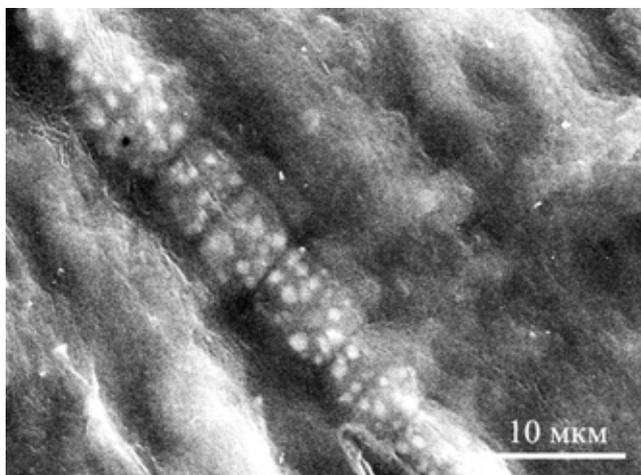


Рис. 2. Фосфатные гранулы в структуре клеток Глеотрихия (обр. 21-90). РЭМ-изображение в режиме вторичных электронов. СЭМ-снимок на JSM-6400 JEOL

Fig. 2. Phosphate granules in the structure of *Gleotrichia* cells (sample 21-90). SEM image in the secondary electron mode of JSM-6400 JEOL

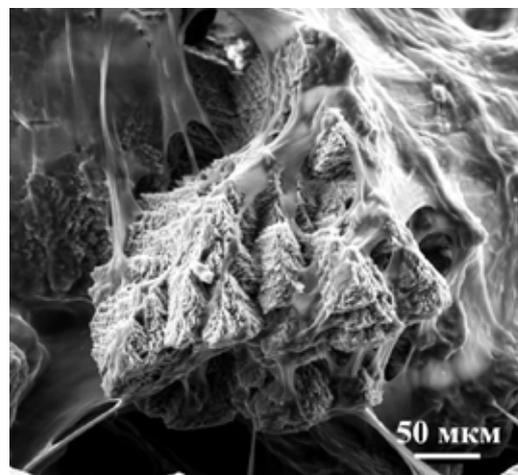


Рис. 3. Скелетные кристаллы кальцита в слизистом полимерном веществе (обр. 21-95). SEM-изображение в режиме отраженных электронов на Tescan Vega 3 LMH

Fig. 3. Skeletal calcite crystals in the mucous polymeric substance (sample 21-95). SEM image in the reflected electron mode Tescan Vega 3 LMH

Таблица 3. Химический состав колоний цианобактерий р. Выми и зеленых водорослей руч. Богдельского по данным микрозондового анализа, мас. %

Table 3. Chemical composition of samples of cyanobacteria colonies in the Vym River and green algae stream Bogadelsky according to microprobe analysis, wt. %

Наименование колоний Name of colonies	Структурные элементы (число анализов) Structural elements (number of analyses)	Mg	Si	P	S	Ca	Na	Cl
<i>Gleotrichia</i>	внеклеточное полимерное вещество extracellular polymeric substance (n = 13)	0.28–1.05	0–1.92	0.2–0.8	0.37–0.63	1.39–2.5	не обн. not detected	не обн. not detected
	клетка / cell (n = 8)	0–0.77	0–0.77	0.21–2.18	0.37–0.92	1.45–8.86	—/—	—/—
<i>Chaetophora</i>	внеклеточное полимерное вещество extracellular polymeric substance (n = 9)	0.48–0.98	Не обн. n/d	0.14–0.93	0.44–0.83	1.29–10.25	0.72–1.23	1.74–5.30
	клетка / cell (n = 8)	0.45–1.87	0–0.64	0.38–3.32	0.18–1.97	0.65–2.73	не опр. not defined	не опр. not defined

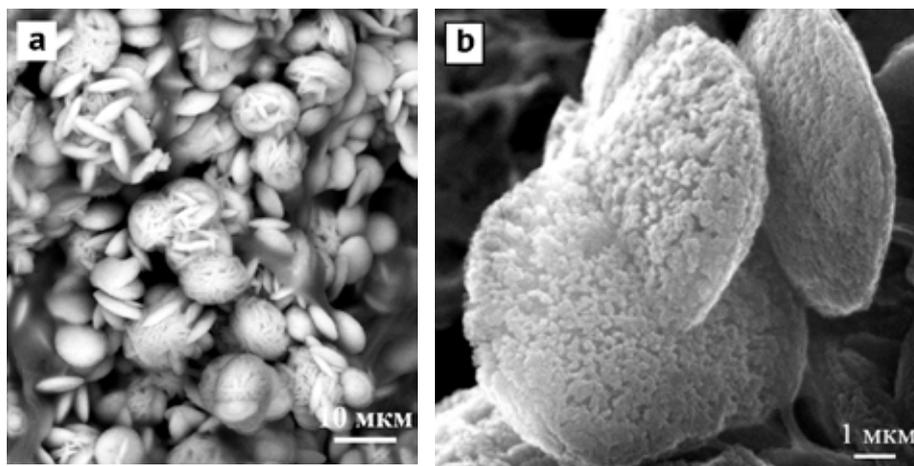


Рис. 4. Фатерит (карбонат кальция) (обр. 21-95): а — сферические и линзовидные образования фатерита во внеклеточном полимерном органическом веществе зеленых водорослей; б — особенности морфологии поверхности полусфер фатерита. SEM-изображение в режиме отраженных электронов на Tescan Vega 3 LMH

Fig. 4. Vaterite (calcium carbonate) (sample 21-95): a — spherical and lens-shaped formations of vaterite in the extracellular polymeric organic matter of green algae; b — features of the surface morphology of vaterite hemispheres. SEM image in the reflected electron mode Tescan Vega 3 LMH

рованный во внеклеточном полимерном веществе колоний зеленых водорослей, представлен агрегатами сферической формы размером 10 мкм, которые сложены из индивидов линзовидных форм (рис. 4, а, б). При увеличении просматривается лучистая структура полусфер. Содержание кальция в кристаллах составляет 40–46 мас. %.

Галит представлен редкими зернистыми скоплениями кубических микрокристаллов на поверхности нитей зеленых водорослей. Для дифрактограммы галита характерны межплоскостные расстояния $d(\text{Å})$ 2.82, 1.99, 1.63. Содержание Na и Cl в слизистом веществе колоний приведено в таблице 3.

При осмотре с использованием светового микроскопа колоний цианобактерий *Gloeotrichia* (обр. 21-70) выявлена более слабая степень минерализации в отличие от других исследованных проб. В высушенных образцах структурными методами идентифицированы кальцит и кварц. Анализ РЭМ-изображений показал, что образования кальцита в пределах или на поверхности колониальной слизи, как правило, визуализируются в виде бесструктурных масс. Отдельные индивиды кальцита подвергнуты значительному растворению с сохранением внешних границ. Размеры кристаллов колеблются в пределах 50–100 мкм. На микроснимках в цитоплазме клеток четко визуализируется обилие валютиновых зерен фосфата кальция. Следует отметить наличие многочисленных и разнообразных диатомей на поверхности цианобактерий.

Изотопный состав углерода указывает на биогенную природу карбоната кальция в изученных минеральных образованиях. Получены значения $\delta^{13}\text{C}$ –3.8 и –7.5 ‰ PDB для карбонатного вещества образцов цианобактерий Глеотрихия (21-90) и зеленых водорослей Хетофора (21-95) соответственно. Обедненность CaCO_3 тяжелым изотопом углерода ^{13}C отражает состав исходной CO_2 , обогащенной легким изотопом углерода ^{12}C , накопленного в процессе фотосинтеза при участии микроорганизмов. Это позволяет нам рассматривать карбонаты как биолиты.

Рассмотренная биокальцификация водорослей и цианобактерий, однако, не исключает и хемогенное осаждение карбоната кальция из водной среды. Сопоставление среды обитания исследованных организмов показало, что все представленные образцы воды, отобранные из исследованных водоемов, различаются по гидрохимическому типу и минерализации (табл. 2). Поскольку концентрация в воде диоксида углерода определяет карбонатный режим водоема, было рассчитано количество водорастворенной CO_2 , которое в водах исследованных трех типов широко варьирует. Образование кристаллов карбоната кальция в неорганических растворах определяется прежде всего соотношением углерода в виде HCO_3^- и CO_2 , на которое влияют pH, температура и другие ионы, при содержании в водах насыщенного количества Ca^{2+} . Наибольшие значения CO_2 наблюдаются в р. Выми. Однако только в руч. Богадельском (проба 21-95в) лабораторно определенное содержание гидрокарбонат-иона 420 мг/дм³ при pH 7.8 превышает равновесное количество свободной угольной кислоты (10.7 мг/дм³). Следовательно, здесь может происходить хемогенное образование CaCO_3 при достаточном количестве кальция.

Для оценки возможности хемогенного осаждения карбоната кальция при испарении из вод также было рассчитано соотношение молярных концентраций: $2\text{mCa}^+ / (\text{mHCO}_3^- + 2\text{mCO}_3^{2-})$. Значение этого гидрохимического коэффициента более единицы свидетельствует о вероятности осаждения CaCO_3 (Геохимия, 2007). Степень пересыщения вод по отношению к карбонатам, высокие содержания ионов кальция, превышающие карбонатную щелочность вод (табл. 2), наблюдаются в водах р. Выми (21-90в) и руч. Богадельского (21-95в), и здесь возможно карбонатообразование абиогенным путем.

Низкие значения гидрохимического коэффициента $2\text{mCa}^+ / (\text{mHCO}_3^- + 2\text{mCO}_3^{2-})$ и водорастворенной двуокиси углерода для вод р. Лузы (21-70в) исключают возможность хемогенного осаждения карбоната кальция из этих вод. При этом, как уже показано, установлена биоиндуцированная минерализация CaCO_3

колониями цианобактерий (обр. 21-70). Наличие агрессивной углекислоты (CO_2 избыточная над равновесной частью — около 3 мг/л при данной концентрации гидрокарбонат-иона) в р. Лузе может приводить к растворению кристаллов кальцита.

Выводы

В данной работе изучена связь геохимии вод и современного минералообразования с участием зеленых водорослей и цианобактерий. Колонии микроорганизмов обитают в речных водоемах Республики Коми с разнообразным химическим составом вод. Исследованы реки бассейна Северной Двины: ультрапресные HCO_3 Ca-Mg-состава р. Лузы, типичные для зоны тайги умеренно континентального климата; пресные SO_4 - HCO_3 Ca-Mg-воды р. Выми, состав которых сформировался благодаря процессам выщелачивания и растворения пермских терригенных и сульфатно-карбонатных пород водосборной площади; техногенно загрязненные солончатые Cl-Na-воды руч. Богдельского. Величина pH исследованных вод — нейтральная — слабощелочная (7.3—7.8), расчетное содержание водорастворенного углекислого газа варьирует в пределах 5.6—15.3 мг/дм³. Макрокомпонентный состав вод в местах обитания микроорганизмов, увеличенные концентрации кальция, превышающие карбонатную щелочность в р. Выми и руч. Богдельском, не исключают хемогенное карбонатоосаждение.

Проведенный комплекс исследований показал, что химический состав воды влияет на морфологические особенности кристаллов и степень минерализации колоний зеленых водорослей и цианобактерий. Установлено, что основной минеральной составляющей во внеклеточном полимерном веществе исследованных фототрофных микроорганизмов, независимо от состава вод, является кальцит. Выявлена и другая полиморфная форма CaCO_3 — фатерит — в слизистой оболочке колоний зеленых водорослей *Chaetophora elegans*. Новообразованный карбонат кальция имеет биогенную природу. В пользу этого свидетельствует изотопный состав углерода карбонатов $\delta^{13}\text{C}$ –7.5 и –3.8 ‰ PDB. Осаждение CaCO_3 является результатом нарушения карбонатного равновесия, и он может индуцироваться благодаря клеточной активности организмов, влияющих на концентрацию кристаллообразующих компонентов во внеклеточном полимерном веществе.

При достаточном содержании фосфора и кальция в нейтральных — слабощелочных водах наблюдается накопление аморфного фосфата кальция в виде валутиновых зерен в трихомах цианобактерий. Единичные кристаллы кварца аутигенной и аллотигенной природы установлены во всех образцах.

Результаты исследования дополнили ранее полученные сведения о процессах биоминерализации водорослей и цианобактерий европейской части России.

Выражаем признательность Ю. С. Симаковой, Б. А. Макееву, М. Ф. Самотолковой, Г. В. Игнатьеву и сотрудникам аккредитованной экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН за высокое качество проведенных аналитических исследований образцов.

Работа выполнена в рамках тем государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600009-2 и 122040600011-5, а также частично темы ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600026-9.

Литература / References

- Билан М. И., Усов А. И. Полисахариды известковых водорослей и их влияние на процесс кальцификации // Биоорганическая химия. 2001. Т. 27. № 1. С. 4—20.
- Bilan M. I., Usov A. I. Polysaccharides of calcareous algae and their influence on the process of calcification. Bioorganic chemistry, 2001, V. 27, No. 1, pp. 4—20. (in Russian)
- Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С. Р. Крайнов, Б. Н. Рыженко, В. М. Швеца. 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)
- Герасименко Л. М., Сапова Е. В., Орлеанский В. К., Ушатинская Г. Т., Жегалло Е. А., Розанов А. Ю., Заварзин Г. А. Силицификация цианобактерий в лабораторной культуре // Кварц, кремнезем. Сыктывкар: Геопринт, 2004. С. 276—277.
- Gerasimenko L. M., Sapova E. V., Orleansky V. K., Ushatinskaya G. T., Zhegallo E. A., Rozanov A. Yu., Zavarzin G. A. Silicification of cyanobacteria in laboratory culture. In: Quartz, silica. Syktyvkar: Geoprint, 2004, pp. 276—277. (in Russian)
- Заварзин Г. А. Микробный геохимический цикл кальция // Микробиология. 2002. Т. 71. № 1. С. 5—22.
- Zavarzin G. A. Microbial geochemical cycle of calcium. Microbiology, 2002, V. 71, No. 1, pp. 5—22. (in Russian)
- Исаченко Б. Л. О биогенном образовании карбоната кальция // Микробиология. 1948. Т. XVII. Вып. 2. С. 118—125.
- Isachenko B. L. On the biogenic formation of calcium carbonate. Microbiology, 1948, V. XVII, No. 2, pp. 118—125. (in Russian)
- Карпов Г. А., Жегалло Е. А., Герасименко Л. М., Зайцева Л. В., Орлеанский В. К., Самылина О. С. Биолитогенез в современных гейзеритах Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2016. 70 с.
- Karpov G. A., Zhegallo E. A., Gerasimenko L. M., Zajceva L. V., Orleansky V. K., Samylina O. S. Biolithogenesis in modern geysers of Kamchatka. Vladivostok: Dalnauka, 2016, 70 p. (in Russian)
- Каткова В. И., Митюшева Т. П., Филиппов В. Н., Симакова Ю. С. Минеральные включения в цианобактериях из водных объектов юга Республики Коми // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. № 4. С. 65—71.
- Katkova V. I., Mityusheva T. P., Filippov V. N., Simakova Yu. S. Mineral inclusions in cyanobacteria from water bodies in the south of the Komi Republic. Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017, No. 4, pp. 65—71. (in Russian)
- Каткова В. И., Митюшева Т. П., Тетерюк Б. И. Особенности минерализации рдестов реки Вымь (Республика Коми) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 1(37), С. 69—75. DOI 10.19110/1994-5655-2019-1-69-75
- Katkova V. I., Mityusheva T. P., Teteryuk B. I. Features of the mineralization of pondweeds in the Vym River (Komi Republic). Proceedings of Komi SC UB RAS, 2019, V. 1, No 37. pp. 69—75. (in Russian)



- Митюшева Т. П. Техногенная гидрогеохимическая аномалия в районе Сереговского рассолопромысла (Республика Коми) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Науч. чтения памяти П. Н. Чирвинского: Сб. науч. ст. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2017. Вып. 20. С. 262–269.
- Mityusheva T. P. Technogenic hydrogeochemical anomaly in the area of the Seregovsky brine field (Komi Republic). Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky: collection of articles of Perm State National Research University, Perm, 2017, Issue 20, pp. 262–269. (in Russian)
- Самылина О. С., Зайцева Л. В., Груздев Д. С., Патутина Е. О., Прокин А. А. Микробиолиты содово-соленого озера Лос-Сиснес (о. Огненная Земля, Чили) // Палеонтологический журнал. 2022. № 4. С. 95–106.
- Samylyina O. S., Zaitseva L. V., Gruzdev D. S., Patutina E. O., Prokin A. A. Microbiolites of the soda-salt lake Los Cisnes (Terra del Fuego Island, Chile). Paleontological Journal, 2022, No. 4, pp. 95–106. (in Russian)
- Цыренова Д. Д., Бархутова Д. Д., Бурюхаев С. П., Лазарева Е. В., Брянская А. В., Замана Л. В. Разнообразие цианобактерий и их участие в образовании минералов в гидротермах Баунтовской группы (Байкальская рифтовая зона) // Микробиология. 2018. Т. 87. № 4. С. 373–385.
- Tsyrenova D. D., Barkhutova D. D., Buryukhaev S. P., Lazareva E. V., Bryanskaya A. V., Zamana L. V. Diversity of cyanobacteria and their participation in the formation of minerals in hydrotherms of the Bauntovskaya Group (Baikal Rift zone). Microbiology, 2018, V. 87, No. 4, pp. 373–385. (in Russian)
- Dhami N.K., Sudhakara R. M., Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review // Frontiers in Microbiology, 2013. Vol. 4. P. 1–13. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314
- Dittrich M., Obst M. Are Picoplankton Responsible for Calcite Precipitation in Lakes? AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2004. Vol. 33(8). pp. 559–564. DOI: 10.1579/0044-7447-33.8.559
- Dupraz C., Reid R. P., Visscher P. T. Microbialites, Modern. Encyclopedia of Earth Sciences Series, 2011, pp. 617–635. DOI:10.1007/978-1-4020-9212-1_195
- Dupraz C. R., Reid R. P., Braissant O., Decho A. W., Norman R. S., Visscher P. T. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats // Earth-Science Reviews, 2009. Vol. 96. № 3. pp. 141–162. DOI:10.1016/j.earsci-rev.2008.10.005
- Ehrlich H. Biominerals // Biological Materials of Marine Origin. Springer Netherlands, 2010. pp. 133–152.
- Kamennaya N. A., Ajo-Franklin C. M., Northen T., Jansson C. Cyanobacteria as Biocatalysts for Carbonate Mineralization // Minerals, 2012. № 2. pp. 338–364. DOI: 10.3390/min2040338
- Konishi Y., Tsukiyama T., Ohno K, Saitoh N, Nomura T, Nagamine S. Intracellular recovery of gold by microbial reduction of AuCl₄ ions using the anaerobic bacterium *Shewanella algae* // Hydrometallurgy, 2006, 81. pp. 24–29. DOI: 10.1016/j.hydromet.2005.09.006
- Obst M., Dittrich M., Kuehn H. Calcium adsorption and changes of the surface microtopography of cyanobacteria studied by AFM, CFM, and TEM with respect to biogenic calcite nucleation, Geochem. Geophys. Geosyst., 2006. Vol. 7. № 6. pp. 1–15. DOI:10.1029/2005GC001172
- Phillips A. J., Gerlach R., Lauchnor E., Mitchell A. C., Cunningham A. B., Spangler L. Engineered applications of ureolytic biomineralization: a review // Biofouling, 2013. Vol. 29. № 6. pp. 715–733. DOI: 10.1080/08927014.2013.796550
- Pentecost A., Riding R. Biomineralization in lower plants and animals. Oxford: Clarendon Press, 1986. P. 73–90.
- Rivadeneira, M. A., Delgado, R., Moral, A., Ferrer, M. R., Ramos-Cormenzana, A. Precipitation of calcium carbonate by *Vibrio* spp. from an inland saltern // FEMS Microbiology. Ecology, 1994. Vol. 13. pp. 197–204. DOI: 10.1016/0168-6496(94)90013-2
- Qiang Shen, Hao Wei, Yong Zhou, Yaping Huang, Hengrui Yang, Dujin Wang and Duanfu Xu. Properties of Amorphous Calcium Carbonate and the Template Action of Vaterite Spheres // J. Phys. Chem. B, 2006. Vol. 110 (7). pp. 2994–3000. DOI: 10.1021/jp055063o
- Yoshida N, Higashimura E, Saeki Y. Catalytic biomineralization of fluorescent calcite by the thermophilic bacterium *Geobacillus thermoglucosidasius* // Applied and environmental microbiology, 2010. Vol.76. № 21. pp. 7322–7327. DOI: [org/10.1128/AEM.01767-10](https://doi.org/10.1128/AEM.01767-10)

Поступила в редакцию / Received 10.10.2023



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

УДК 55 (091):553.94

DOI:10.19110/geov.2024.2.4

От находок угольной гальки к открытию месторождений (к 100-летию Печорского угольного бассейна)

И. С. Астахова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
astakhova@geo.komisc.ru

Статья посвящена истории открытия угольных месторождений в связи со 100-летием Печорского угольного бассейна. Показаны этапы геологических исследований, начиная с отдельных находок угля и их упоминания в публикациях ученых. Обращено внимание на важность экспедиции под руководством А. А. Чернова в 1924 г. Освещены важнейшие результаты научной работы А. А. Чернова, приведены отрывки из полевых дневников. Рассмотрены вопросы научного обоснования Печорского угольного бассейна.

Ключевые слова: уголь, Чернов, экспедиция, Печорский угольный бассейн

From the find of coal pebbles to the discovery of deposits (the 100th anniversary of the Pechora coal basin)

I. S. Astakhova

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The article is devoted to the history of the discovery of coal deposits in connection with the 100th anniversary of the Pechora coal basin. The stages of geological research are shown from individual finds of coal and references in scientific publications. Attention is paid to the importance of the expedition led by A. A. Chernov in 1924. The most important results of the scientific work by A. A. Chernov are covered, and excerpts from his field diaries are given. The issues of scientific substantiation of the Pechora coal basin are considered.

Keywords: coal, Chernov, expedition, Pechora coal basin

Днем рождения Печорского угольного бассейна считается 1 сентября 1934 г., когда была сдана в промышленную эксплуатацию первая воркутинская шахта. История разработки угольных месторождений Печорского бассейна достаточно хорошо изучена. Опубликовано большое количество архивных материалов, монографии и научные статьи, отдельные издания посвящены геологам, сделавшим большой вклад в освоение угольных месторождений. Однако сейчас почти забыты некоторые на первый взгляд незначительные факты об отдельных находках каменной гальки и целенаправленные изыскания. Экспедиции 1924 г. и последующие под руководством А. А. Чернова сыграли важную роль в открытии и прогнозировании крупного угольного бассейна.

Находки угольной гальки, отраженные в печатных работах до начала XX века

Первые предположения об угольных месторождениях в Вологодской губернии по рекам Ухта и Вымь дает ученый-химик Т. С. Борноволоков. По его словам, местные жители препятствовали открытию угольных

месторождений. Т. С. Борноволоков изучил и определил свойства угля, сравнил его с углями из месторождений Англии и Шотландии. Обнаруженные угли оказались невысокого качества, но ученый сделал предположение: «обыкновенно верхние слои всегда бывают не столь добротны, ... и можно надеяться, что при разработке достигли до лучшего» (Борноволоков, 1809, с. 109). Позднее вологодский купец А. Ф. Деньгин в «Отечественных записках» сообщает, что «по р. Печора, особо выше Усы, на берегу, называемом Смоляной Материк, много имеется каменного угля, никуда не употребляемого» (Деньгин, 1828, с. 369). Минералог, профессор Э. К. Гофман в 1848 г. в ходе экспедиции на Северный Урал и Пай-Хой пересек ряд притоков р. Воркуты и р. Усу, на которой отметил песчаник с прослойками углей (Гофман, 1856).

В 1857 г. Морское ведомство, нуждающееся в каменном угле для Архангельского порта, направило специальную партию под руководством горного инженера А. И. Антипова. На тот момент были известны находки каменного угля на реках Соплес, Косме, Усе и Айюве. В ходе экспедиции район исследования был расширен областью распространения «каменноуголь-

Для цитирования: Астахова И. С. От находок угольной гальки к открытию месторождений (к 100-летию Печорского угольного бассейна) // Вестник геонаук. 2024. 2 (350). С. 38–45. DOI: 10.19110/geov.2024.2.4

For citation: Astakhova I. S. From the find of coal pebbles to the discovery of deposits (the 100th anniversary of the Pechora coal basin). Vestnik of Geosciences, 2024, 2 (350), pp. 38–45, doi: 10.19110/geov.2024.2.4



ного песчаника как формации, в которой присутствуют благонадежные месторождения каменного угля» (Антипов, 1858, с. 5). Отрядами были обнаружены пластовые проявления каменного угля в слоях черных и серых глин на реках Шугор, Соплес, Печоре (д. Позорха), Большой и Малый Аранец, Большая Сыня, Шарью. Исследования качества углей позволили отнести их к бурым с содержанием углерода до 42.04 %, а также сделать вывод о практической бесперспективности месторождений в связи с небольшим распространением.

Промышленник М. К. Сидоров поручил купцу М. Н. Латкину собрать сведения о залегающих каменного угля на р. Печоре для обеспечения судоходства. В 1855 г. заведующий брусоточильным предприятием В. Комлин с крестьянами А. Кузнецовым и В. Андреевым нашли каменный уголь в Усть-Сысольском уезде по р. Илыч, на правом берегу р. Шугор, по р. Соплес. В Мезенском уезде обнаружены выходы угля по рекам Б. и М. Аранец, Сыне, Хырмор, впадающей в р. Усу, по р. Малая Уса, в бассейне рек Косью, Цильме, Ижме. Все эти месторождения были осмотрены и исследованы М. К. Сидоровым и его доверенными М. П. Золотиловым и Г. Степановым в 1860–1861 гг. В связи с этим в 1864 г. М. К. Сидоров просил об отводе ему некоторых месторождений для разработки, но Управление Архангельской губернии отказало. Однако образцы каменного угля с р. Аранец, где «напластование их толщин до 14 и длиной до 350 футов», были представлены неоднократно на разных выставках (Сидоров, 1881, с. 168).

В 1879 г. И. Ф. Шмальгаузен в журнале «Труды Санкт-Петербургского общества естествознания» описал выходы углей на р. Усе и привёл первые сведения об ископаемой флоре Печорского бассейна (Шмальгаузен, 1879). Материалом для исследования служили образцы, собранные при геологических исследованиях А. И. Антипова в 1857 г. и А. А. Штукенберга в 1874 г. с правого берега р. Печоры ниже д. Аранец. Ученый отметил сходство печорской флоры с уже изученной им флорой Кузнецкого и Тунгусского бассейнов и отнес ее к юрскому возрасту. В 1886 г. К. Д. Носилов в журнале «Записки минералогического общества» сообщил о каменных углях на Северном Урале (Носилов, 1886). В 1888 г. В. Ф. Алексеев в «Горном журнале» опубликовал результаты анализов печорских углей (Алексеев, 1888). В 1908 г. И. М. Красноперов в журнале «Землеведение» описал каменные угли на р. Цильме (Красноперов, 1908). О печорском угле в 1909 году рассказал журнал «Русское судоходство» (Попов, 1909), а также И. В. Шабалин в книге «Ухтинский нефтеносный район» (Шабалин, 1909). В 1911 г. о печорских углях в своей книге писал В. Н. Мамонтов (1911), а журнал «Известия Архангельского общества изучения Русского Севера» сообщил об углях по рекам Ижме, Айюве, Дресвянке, Цильме, Усе, Печоре и Илыч (Латкин, 1911).

Сведения о находках угля на реках Нече, Инте, Б. и М. Сыне, Усе приведены в работе инженера-геолога М. С. Волкова, в которой указано, что данные образцы были обнаружены местным жителем И. Н. Сорвачевым и вологодским дворянином, чиновником по крестьянским делам П. П. Матафтиным. В 1912 г. они были переданы для исследования академику Ф. Н. Чернышеву (Волков, 1931). Дополнительно указано,

что точного местонахождения описанных обнажений и образцов не имеется, что затрудняет сравнительный анализ качества углей. В конце публикации приводилась благодарность Н. А. Кулику за предоставленные материалы, к которым, возможно, имел доступ ученый после смерти Ф. Н. Чернышева в 1914 г.

Крупным обобщением по угольной базе России стал на тот момент коллективный труд «Очерки месторождений ископаемых углей России», изданный в 1913 г. Геологическим комитетом для XII Международного геологического конгресса «The Coal Resources of the World». В работе приводятся сводные данные по открытым ископаемым углям, начиная от западных границ России до Тихоокеанского побережья. Однако в предисловии указывалось, что «в очерк не вошли угли Архангельской губернии, встречающиеся в виде тонких пропластков среди артинских и юрских слоев и, по-видимому, лишенные практического значения» (Очерк ..., 1913, с. VI).

Результаты экспедиции А. А. Чернова в 1924 году

После Октябрьской революции в 1920 году была создана Северная научно-промысловая экспедиция, которая изучала производительные силы Русского Севера с целью их практического использования. В 1921 г. был организован Верхнепечорский отряд под руководством А. А. Чернова, который проводил исследования в верховьях притока р. Печоры на р. Илыч. Были обнаружены залежи графита, имеющие протяженность свыше 23 верст (Краткий ..., 1921).

В 1923 г. исполнительным комитетом Коми автономной области (Коми АО) в Усинском районе были организованы разведочные работы под руководством Г. П. Семьяшкина. Работала экспедиция в районе нижнего течения р. Усы. В четырех скважинах на р. Нече был обнаружен каменный уголь. Результаты бурения и образцы каменного угля были направлены в Госплан, что стало первым шагом к открытию Печорского угольного бассейна. Уже 3 июля 1924 г. на заседании президиума исполнительного комитета Коми АО было принято решение о дополнительном финансировании геологического отряда А. А. Чернова для расширения экспедиционных работ¹. На основании сведений работ Неченской экспедиции А. А. Чернов с шестью научными сотрудниками изменил ранее намеченный маршрут, и летом 1924 г. геологи начали работать в бассейне р. Косью.

Отряд В. А. Варсанюфьевой в 1924 г. продолжил исследования в бассейне р. Илыч. Отряд Т. А. Добролюбовой производил исследования по рекам Подчерем и Шугор, были детально исследованы выходы каменноугольных пород и собрана богатая фауна.

Отряд Е. Д. Сошкиной в сопровождении коллектора Г. А. Чернова описывал разрезы от р. Усы до устья р. Косью. На р. Б. Инта, правом притоке р. Косью, при впадении р. Угольной, в обнажении между полого залегающими песчаниками и глинистыми сланцами в расчистках было вскрыто два угольных пласта мощностью 0.57 и 1.5 м. Это было начало открытия Интинского угольного месторождения.

¹ НА РК, ф.р-3, оп.1, д. 1550, лл. 47, 50 / ¹ SA RK, f.r-3, op.1, d. 1550, pp. 47, 50 (in Russian)

Отряд А. А. Чернова с М. И. Шульгой-Нестеренко и студентом В. П. Тебеньковым производил исследования бассейна р. Косью до устья Каменки и по р. Кожым. В полевом дневнике А. А. Чернова указано, что на р. Косью отряд прибыл 14 августа. На следующий день были изучены отложения вблизи д. Дресвянка и отмечены ледниковые отложения в строении берега (рис. 1). В своем дневнике А. А. Чернов сделал замечание, что впервые разведку на уголь и буровые работы здесь проводил П. П. Матафтин, который приезжал совместно с И. Н. Сорвачевым.

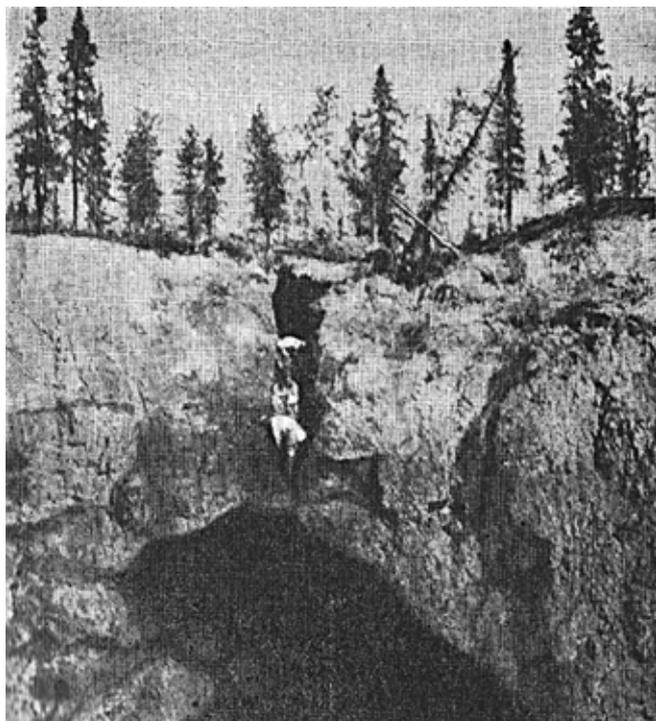


Рис. 1. Река Неча, левый приток Косью. Первое угольное ущелье (Чернов, 1940)

Fig.1. Necha River, left tributary of Kosyu. The first coal finds (Chernov, 1940)

25 августа на отмели выше рек Нечи и Б. Инты были обнаружены три куска углей, также указаны находки угля и по р. Б. Сырьюга. Сплаваясь по р. Черной, А. А. Чернов описал рельеф, берега с железистыми конкрециями и выходами торфяника. В устье реки на галечном островке была обнаружена угольная галька. Далее в дневнике приводится описание обнажений вверх по р. Косью до Каменки. Выше устья Вой-Пендана была заложена канава, в которой была обнаружена угленосная толща. Отмечены выходы угля в виде изогнутых и полого залегающих пластов (рис. 2).

Далее в южном направлении приводится описание обнажений, представленных песчаниками с прослойками галечника и глин. Местами указывается обнаружение гальки бурого угля. В конце описанного разреза было обнаружено окаменелое дерево с угольными прослойками до 2 см. По углистым прослойкам было установлено, что свита вверх по реке падает на юг с углом, не превышающим 18°. Были отобраны 8 проб. А. А. Чернов дал описание: «... уголь блестящий тускло, с ровным и поперечным изломом, рассыпается на кусочки...». Было установлено, что «в бассейне Косью залегают две группы углесодержащих осадков: одна нижнепермского-артинского возраста, другая более юного, чем артинский, предположительно верхнепермского возраста» (Чернов, 1925, с. 50).

28 августа отряд А. А. Чернова прибыл на р. Кожым. Маршруты пролегали вверх по течению реки, и расстояние от обнажений и точек наблюдения дается в шагах (рис. 3). В первых трех обнажениях А. А. Чернов

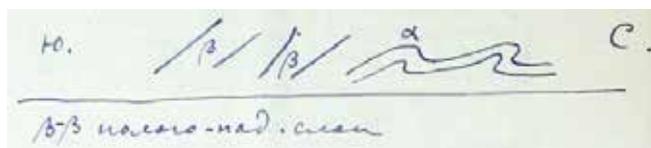


Рис. 2. Зарисовка обнажения по р. Косью из полевого дневника А. А. Чернова. 1924 г.²

Fig.2. Sketch of outcrop along the Kosyu river from A. A. Chernov's field diary. 1924²

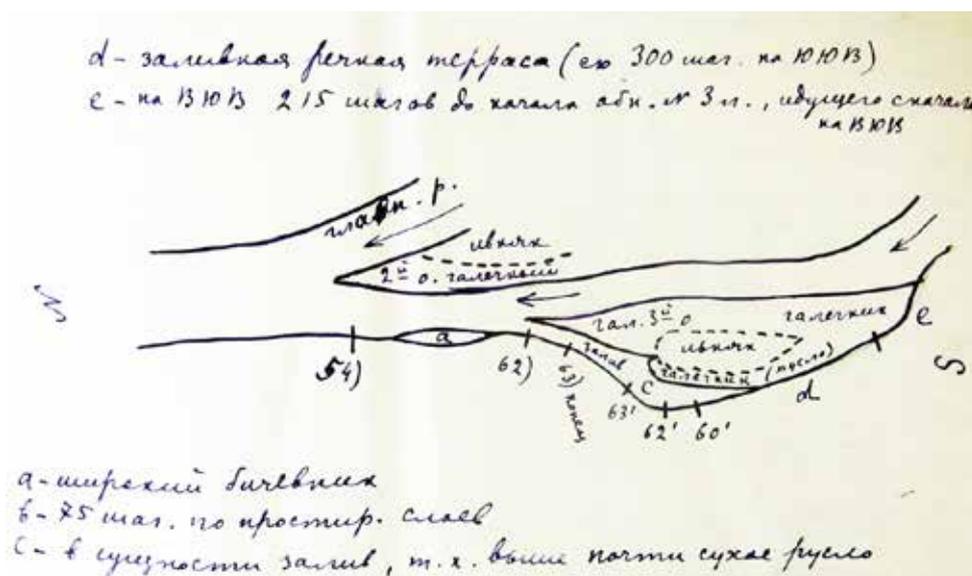


Рис. 3. Схема маршрута по р. Кожым из дневника А. А. Чернова. 1924 г.²

Fig.3. Scheme of the route along the Kozhym river from A. A. Chernov's diary. 1924²

² Чернов А. А. Дневники р. Косью, Кожым, Сарь-юга, Б. Инта (описание рек). 1924, 1925, 1927 гг. // Фонды Полярно-Уральского производственного геолого-разведочного объединения. 1927ф. Инв. №30.

² Chernov A. A. Diaries of the r. Kosyu, Kozhym, Sar-yuga, B. Inta (description of rivers). 1924, 1925, 1927. Funds of the Polar-Ural Production Geological Exploration Association. 1927f. Inv. No. 30. (in Russian)



не нашел уголь и привел сводное описание пород с указанием остатков фауны. В обнажении на р. Яран-Надега-Щелье описаны выходы угля. В нем бурый уголь более плотный, обнажается более чем на 3 м над уровнем воды и уходит под галечник на 4 м. В этом же обнажении обнаружены ядра ископаемых деревьев 0.3 м в поперечнике с угольной корочкой, которые были погребены в лежащем положении. Далее по берегу были обнаружены выходы «зольных углей» мощностью до 0.4 м. По р. Чер-Яма-Щелье также были обнаружены небольшие выходы угля мощностью 0.8 м. В угле обна-

ружены прослой сланца до 0.1 м, уголь хорошо колотся как по напластованию, так и по горизонтальному кливажу.

Полученные в 1924 г. материалы по угленосности в разрезах рек Нечи, Б. Инта, Кожым, Косью А. А. Чернов обобщил в работе «Угленосные районы бассейна Косью-ю в Печорском крае по исследованиям 1924 г.» (рис. 4). Основным результатом работ было выделение разновозрастных углей и установление их качества относительно возраста. Артинская угленосная толща была прослежена в виде полос в восточной части бассейна

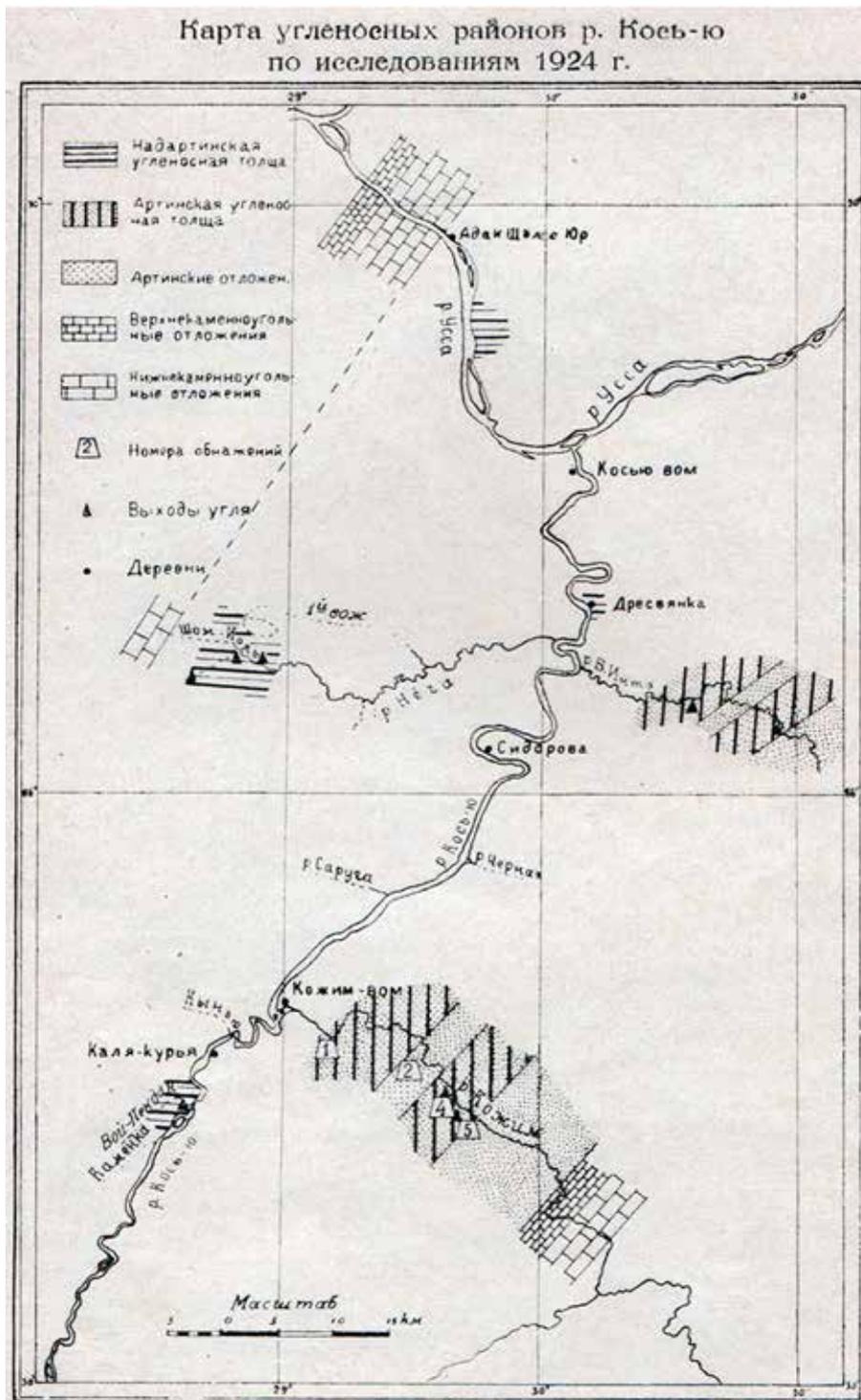


Рис. 4. Карта угленосных районов р. Косью по исследованиям 1924 г. (Чернов, 1925)

Fig. 4. Map of coal-bearing areas at the Kosyu river according to research in 1924 (Chernov, 1925)



р. Косью на р. Кожым и Б. Инта, породы смяты в складки и продуктивные углесодержащие толщи были приурочены к синклиналиям. Обнаружено, что верхнепермские угленосные осадки залегают в виде пологих складок. Анализ углей показали, что они относятся к переходным от бурых к каменным углям. В артинских углях, в отличие от верхнепермских, было установлено более значительное содержание кокса, серы, и их отнесли к каменным углям (сухим или жирным газовым). Однако то, что пробы были отобраны с поверхности, позволило предположить улучшение свойств угля с глубиной. А. А. Чернов в заключение дал рекомендации к увеличению и расширению разведочных работ в бассейне р. Кожым (Чернов, 1925).

Основываясь на обнаруженных в 1924 г. выходах пластов угля и на отдельных находках угольной гальки по притокам р. Косью, которые к тому времени не были экспедиционно изучены, А. А. Чернов сделал предположение о крупном угленосном бассейне. «В настоящее время начинают выступать на северо-востоке европейской части СССР неясные контуры большого каменноугольного бассейна, который естественно назвать Печорским» (Чернов, 1924, с. 106).

В более поздних работах А. А. Чернова были сделаны предположения об угленосных свитах Печорского края, которые выходили за пределы бассейна р. Косью. Уже в 1925 г. А. А. Чернов указал площадь Печорского бассейна 4000 кв. км после экспедиционных исследований по рекам Аранец, Б. Сяня, Вангыр, Сарьюге, Черной. Расширение площади угленосного бассейна было обусловлено обнаружением в 1925 г. отрядом Т. А. Добролюбовой третьей свиты нижнекаменноугольного возраста мощностью до 1.5 м в районе р. Вуктыл (Чернов, 1926). Позднее увеличиваются объемы поисково-разведочных работ на р. Кожым, направленные Геологическим комитетом и Угольным геолого-разведочным институтом. В 1925 г. работала партия М. С. Волкова, результатом которой стало обнаружение 11 пластов угля общей мощностью 9.79 м. В 1927–1929 гг. работал отряд А. Ф. Лебедева, в 1930–1932 гг. — партия А. К. Матвеева.

По представлениям А. А. Чернова, на тот момент бассейн имел форму клина, острие которого обращено к югу (бассейн р. Косью), а широкая часть — к северу, и эту северную границу еще предстояло установить дальнейшими изысканиями (Александр..., 1995). В апреле 1931 г., делая доклад на Второй конференции по изучению производительных сил Северного края, А. А. Чернов отметил: «То, что угленосный бассейн Печоры продолжается в северном направлении, что он уходит под наносы Большеземельской тундры, для меня было достаточно ясно уже в 1924 г.» (Чернов, 1933, с. 29).

Однако в научных кругах долгое время открытие А. А. Черновым крупного угольного бассейна пермского возраста вызывало вполне объяснимое недоверие. Еще на начальном этапе исследований А. А. Чернов писал: «Как известно, на западном склоне Северного Урала нет значительных толщ каменного угля... В настоящее время шансы на нахождение промышленного угля нужно считать более значительными, в нижнекаменноугольную эпоху были более благоприятные условия для накопления мощных пластов угля в области западного склона Северного Урала» (Краткий ..., 1921, с. 2). На тот период изучения ископаемых углей в Европе было

установлено, что уголь встречается в разновозрастных отложениях, но основные запасы сосредоточены в породах каменноугольного и третичного периодов. В России наиболее древние месторождения угля были зарегистрированы в верхнем девоне в шунгитовых отложениях на севере России. К каменноугольным углям были отнесены крупные месторождения на Шпицбергене, а в России — в Московском, Донецком бассейнах и на Урале. К тому моменту угольные месторождения пермского возраста являлись редкими и некрупными, но были отмечены месторождения данного возраста в Богемии, Саксонии и центральной Франции (Пригоровский, 1927). Возраст известного в России на тот момент Кузнецкого угольного бассейна тоже был достаточно дискуссионным — от карбона до юры (Бутов, Яворский, 1922). Работами палеонтолога М. Д. Залесского был определен возраст продуктивной толщи как пермский. В 1913 г. в работе «Гондванская флора бассейна р. Печоры» им была описана небольшая коллекция растительных остатков с р. Адзвы, собранных выше Шом-Щельи А. В. Журавским в 1905 г. и в Шом-Шоре (руч. Угольный) Н. А. Куликом в 1909 г. Возраст пород, заключающих эти остатки, ученым был установлен как верхнепермский (Залесский, 1913).

А. А. Чернов вспоминал: «...вы думаете, легко было доказать, что эти печорские угли имеют большое значение? Нет. Я помню, на первом заседании смеялись, что на Урале пермские угли. Нет таких. Там есть соль, гипс и т. д. По моему настоянию было созвано специальное совещание угольщиков, причем один очень почтенный специалист прямо заявил: «Вот чем нас заставляют заниматься, какими-то пермскими углями, которые не имеют никакой перспективы» (Печорский, 1957, с. 260).

Только в процессе изучения пермских пород была установлена палеогеографическая обстановка углеобразования в Печорском бассейне. А. А. Чернов на протяжении десятка лет уделял значительное внимание изучению пермских отложений Урала и Печорского края. Он установил наличие озерно-болотистых бассейнов и проследил фациальные изменения пермских отложений в меридиональном направлении вдоль западного склона Урала и в широтном направлении от Урала до Тимана. Исследования А. А. Чернова показали, что в пермский период в южных районах морские отложения формировались в условиях засушливого климата, что привело к образованию здесь солей, а в северных районах существовала обширная прибрежная зона с высокой влажностью, благоприятная для накопления растительных остатков и образования углей (Чернов, 1933).

Впервые схема стратиграфического расчленения пермских пород была приведена в совместной работе с Г. А. Черновым по результатам комплексной экспедиции СОПС Академии наук в 1935 г. Пермские отложения были расчленены на четыре яруса: 1 – P_2^2 — татарский ярус (не вскрыт, самая верхняя угленосная толща озерного происхождения); 2 – P_2^1 — печорский ярус (мощность 700 м, озерного или аллювиального происхождения, выявлен на пр. берегу р. Косью в обн. Красный Камень, обнаружены стволы окаменелых деревьев); 3 – P_1^2 — усинский ярус (мощность 1200 м, основная паралическая угленосная толща, переходная от морских к континентальным (дельтовым) условиям обра-



зования; 4 — P_1^1 — артинский ярус (мощность 1000 м, морская терригенная толща) (Чернов, 1940).

В 1927 г. вышла крупная работа угольной секции Геологического комитета «Запасы углей в СССР» под редакцией М. М. Пригоровского (Пригоровский, 1927). В бассейне Печоры указаны были признаки угленосности по рр. Нече, Инте, Черной и Кожым; вдоль рек Сынью, Аранец, Вуктыл. Со ссылкой на А. А. Чернова приводятся сведения о возможных запасах в исследованных районах в миллиардах тонн. Дополнительными работами 1925 г. только по р. Кожым установлен запас в 1660 тыс. т (Пригоровский, 1927). В этой же работе дается предположение об обнаружении в бассейне р. Печоры одного крупного или несколько более мелких бассейнов.

В более позднем обобщении в 1930 г. А. Ф. Лебедев предположил масштабы угленосности в бассейне Печоры: «...огромный угленосный бассейн, может быть подразделенный на несколько бассейнов или районов меньшего размера с каменными и бурными углями нижнепермского и верхнепермского возраста. Кроме того, намечается значительно, по-видимому, меньшая угленосная полоса нижнекаменноугольного возраста» (Лебедев, 1930, с. 93). В этой же работе М. М. Пригоровский обозначил одну из главных проблем печорских углей — качество (Пригоровский, 1930). Сам А. А. Чернов писал: «Совершенно иные, можно сказать необыкновенно обширные перспективы рисуются для применения печорских углей в том случае, если среди них будут найдены хорошо коксующиеся угли с малым содержанием серы» (Чернов, 1926, с. 10).

Переломным в геологическом изучении бассейна стал 1930 г., когда Г. А. Чернов, работавший в составе партии Н. Н. Иорданского, обнаружил на р. Воркуте высококачественные угли, что способствовало переходу к планомерному изучению Печорского бассейна и началу его освоения.

Заключение

К началу XX в. имелись многочисленные опубликованные в научной и краеведческой литературе сведения о находках каменного угля в различных местах Печорского края. Тем не менее следует подчеркнуть, что предпринятые в XIX — начале XX в. экспедиции по изучению территории Печоры не имели своей прямой целью изучение угольных недр, они давали информацию о некоторых находках и регистрировали крайне скудные факты геологического характера. Печорские угли, представляющие собой небольшие залежи или прослои, долгое время не привлекали к себе внимания из-за плохого качества и удаленности от потребляющих районов. Результаты экспедиции А. А. Чернова в 1924 году дали толчок для проведения дальнейших поисковых работ. Научное обоснование А. А. Чернова о возрасте угленосных толщ, условиях залегания и масштабах распространения привело к открытию новых месторождений и промышленному освоению Печорского угольного бассейна.

Сегодня Печорский угольный бассейн занимает крайнюю северо-восточную часть европейской части России. На севере граница бассейна проходит по побережью Карского и Печорского морей, на востоке — по Приполярному и Полярному Уралу, на западе —

по нижнему течению р. Колвы, на юге — по верховьям р. Косью. В бассейне выделяют шесть угленосных районов: Воркутинский, Хальмерьюский, Интинский, Карский, Коротаихинский и Шарьюско-Адзвинский (Справки..., 2023). На 1 января 2023 г. учтены запасы по 11 месторождениям каменного угля, составляющие 6.7 млрд т кат. А+В+С₁ и 454.783 млн т категории С₂. Забалансовые запасы оцениваются в 5.872 млн т. Более 3/4 балансовых запасов угля сосредоточены на четырех разрабатываемых месторождениях: Интинском (26 %), Воргашорском (22.3 %), Усинском (21.4 %) и Воркутском (11.1 %).

Автор выражает благодарность рецензентам за кропотливый труд и детальное изучение материала, позволившие улучшить статью и найти новые аспекты в исследуемой проблеме.

Литература / Reference

- Александр Александрович Чернов: геолог и палеонтолог: Сб. / Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Коми науч. центр, Ин-т геологии; Ред.-сост. А. И. Елисеев; Отв. ред. и авт. предисл. Н. П. Юшкин. СПб.: Наука; С.-Петербург. изд. фирма, 1995. 255 с.
- Aleksander Aleksandrovich Chernov: geologist and paleontologist: Collection. Institute of geology Komi SC UB RAS, Ed. A. I. Eliseev, Resp. ed. and preface by N. P. Yushkin. St. Petersburg: Nauka, 1995, 255 p. (in Russian)
- Алексеев В. Ф. Химическое исследование уральских каменных углей // Горный журнал. 1888. № 4. С. 67—106.
- Alekseev V. F. Chemical research of Ural coals. Mining Journal, 1888, No. 4, pp. 67—106. (in Russian)
- Антипов А. И. О горных исследованиях в Печорском крае, произведенных в 1857 году // Горный журнал. 1858. Ч. II. Кн 4. С. 1—113.
- Antipov A. I. About mining research in the Pechora region carried out in 1857. Mining Journal, 1858, Part II, pp. 1—113. (in Russian)
- Борноволоков Т. С. Записка о доманите (*Ardesia bituminosa Wologdiensis*), горном масле и каменном угле, находящихся в Вологодской губернии в Яренском округе при реках Выме и Ухте, с присовокуплением правил, как из доманита готовить карандаш или черный мел // Тр. Вольн. эконо. об-ва. Новые продолж. Т. 61. 1809. С. 103—115.
- Bornovolokov T. S. A note about domanite (*Ardesia bituminosa Wologdiensis*), mountain oil and coal located in the Vologda province in the Yarenga district near the Vyma and Ukhta rivers, with the addition of rules on how to prepare a pencil or black chalk from domanite. Proc. of Volnoe econom. Society, New cont., V. 61, 1809, pp. 103—115. (in Russian)
- Волков М. С. Ископаемые угли бассейна р. Печоры // Труды Главного геолого-разведочного управления ВСНХ СССР. Вып. 18. М.; Л.: ГПРУ, 1931. 31 с.
- Volkov M. S. Fossil coals of the river basin Pechory. Proceedings of the Main Geological Exploration Directorate of the Supreme Economic Council of the USSR. Moscow — Leningrad: Geological Publishing House GGRU, 1931, 18, 31 p. (in Russian)
- Гофман Э. К. Северный Урал и береговой хребет Пай-Хой: исслед. экспедиции, снаряж. Имп. Рус. геогр. о-вом в 1847, 1848 и 1850 годах. СПб.: Типография Импер. АН, 1856. Том 2. 521 с.



- Hoffman E. K. The Northern Urals and the Pai-Khoi coastal range: research. Expeditions, equipment. Imp. Rus. geogr. soc. in 1847, 1848 and 1850. St. Petersburg: Printing House of the Imperial Academy of Sciences, 1856, V. 2, 521 p. (in Russian)
- Деньгин А. Ф. Сведения о реке Печора // Отечественные записки. 1828. Ч. 36. С. 349—379.
- Dengin A. F. Information about the Pechora River. Domestic notes, 1828, Part 36, pp. 349—379. (in Russian)
- Залеский М. Д. О гондванской флоре бассейна реки Печоры // Записки Уральского общества любителей естествознания. СПб.: Тип. Е. Н. Ершова, 1913. Т. 33. С. 1—39.
- Zalesky M. D. On the Gondwana flora of the Pechora River basin. Notes of the Ural Society of Natural Science. St. Petersburg: E. N. Ershov Publishers, 1913, V. 33, pp. 1—39. (in Russian)
- Красноперов И. М. Зырянская община на Севере России // Землеведение. 1908. Т. 15, № 2. С. 59—87.
- Krasnoperov I. M. Zyryan community in the North of Russia. Geosciences, 1908, V. 15, No. 2. pp. 59—87. (in Russian)
- Краткий очерк работ 1921 г. Северная научно-промысловая экспедиция. Петроград: Геол. ком., 1921. 4 с.
- Brief outline of the work. 1921, Northern scientific and fishing expedition. Petrograd, 1921, 5 p. (in Russian)
- Латкин О. М. Наши горные богатства // Известия Архангельского общества изучения Русского Севера. 1911. № 10. С. 775—777.
- Latkin O. M. Our mining wealth. Proceedings of the Arkhangelsk Society for the Study of the Russian North. 1911, No. 10, pp. 775—777. (in Russian)
- Лебедев А. Ф. Угли бассейна реки Печора // Обзор главных месторождений углей и горючих сланцев СССР. Л.: ГПРУ, 1930. С. 91—99.
- Lebedev A. F. Coals of the Pechora River basin. Review of the main deposits of coal and oil shale of the USSR. Leningrad: Publication of the Geological Committee, 1930, pp. 91—99. (in Russian)
- Мамонтов В. Н. Геологические исследования и полезные ископаемые в районе Ухта — Печора Камской железной дороги. СПб.: Тип. А. Ф. Дресслера, 1911. 286 с.
- Mamontov V. N. Geological research and minerals in Ukhta — Pechora Kama railway area. St. Petersburg: A. F. Dressler Publishers, 1911, 286 p. (in Russian)
- Носилов К. Д. О геологических экспедициях на Северном Урале // Записки С.-Петербур. минерального общества. СПб.: Тип. А. Якобсона. Т. 22. Ч. 2. С. 317—320.
- Nosilov K. D. On geological expeditions in the Northern Urals. Notes of the St. Petersburg Mineral Society. St. Petersburg: A. Yakobson Type, V. 22, Part 2, pp. 317—320. (in Russian)
- Очерк месторождений ископаемых углей России. СПб.: Тип. М. М. Стасюлевича, 1913. 601 с.
- Essay on fossil coal deposits in Russia. St. Petersburg: M. M. Stasyulevich Publishers, 1913, 601 p. (in Russian)
- Печорский угольный бассейн / Ред. Б. Л. Афанасьев и др. Сыктывкар, 1957. 328 с.
- Pechora coal basin, collection of articles. Editorial Board: B. L. Afanasyev et al., Syktyvkar, 1957, 328 p. (in Russian)
- Попов В. Н. Исследование водных путей Ухтинского нефтеносного района // Русское судоходство. 1909. №3. С. 22—37.
- Popov V. N. Investigation of waterways of the Ukhta oil-bearing area. Russian shipping. 1909, No. 3, pp. 22—37. (in Russian)
- Пригоровский М. М. О проблеме печорских углей // Обзор главнейших месторождений углей и горючих сланцев СССР. М.; Л.: ГПРУ, 1930. С. 153—154.
- Prigorovsky M. M. On the problem of Pechora coals. Review of the main deposits of coal and oil shale of the USSR. Leningrad: Publication of the Geological Committee, 1930, pp. 101—102. (in Russian)
- Пригоровский М. М. Запасы углей в СССР: Объяснительная записка к сводке запасов углей, составл. угольной секцией в янв. 1927 г. // Материалы по общей и прикладной геологии. Вып. 111. 1927. С. 23—56.
- Prigorovsky M. M. Coal reserves in the USSR: An explanatory note to the summary of coal reserves of the coal mine for January 1927. Materials on general and applied geology. Issue 111, 1927, pp. 23—56.
- Сидоров М. К. Север России. О горных его богатствах и препятствиях к их разработке. СПб.: Типография Д. И. Шеметкина, 1881. 240 с.
- Sidorov M. K. North of Russia. About its mining wealth and obstacles to their development. St. Petersburg, 1881, 240 p. (in Russian)
- Справки о состоянии и перспективах использования МСБ Республики Коми на 01.09.2023. <https://atlaspacket.vsegei.ru/?v=msb2021&ysclid=lrjc5j1xat656965784>
- Certificates on the status and prospects for the use of SMEs in the Komi Republic as of 09/01/2023. (in Russian)
- Чернов А. А. Краткие предварительные сведения о работах Печорского геологического отряда Северной научно-промысловой экспедиции летом 1924 года // Коми му. 1924. № 7—10. С. 105—106.
- Chernov A. A. Brief preliminary information about the work of the Pechora Geological Team of the Northern Scientific and Commercial Expedition in the summer of 1924. Komi Mu, 1924, No. 7—10, pp. 105—106. (in Russian)
- Чернов А. А. Угленосные районы бассейна Косью в Печорском крае по исследованиям 1924 г. Л.: Геол. ком., 1925. 55 с. (Материалы по общей и прикл. геологии; Вып. 119).
- Chernov A. A. Coal-bearing areas of the Kosyu basin in the Pechora region according to researches in 1924. Leningrad: Publishing house of Geol. Com., 1925, 55 p. (Materials on general and applied geology of Geol. Com.; Issue 119). (in Russian)
- Чернов А. А. Каменный уголь: литературные данные о нахождении каменного угля в бассейне р. Печоры // Коми му. 1926. № 6(28). С. 3—12.
- Chernov A. A. Hard coal: literature data about finding of coal in Pechora basin. Komi mu, No. 6 (28), 1926, pp. 3—12. (in Russian)
- Чернов А. А. Геологическая съемка Печорского края и проблема его недр // Материалы II конф. по изучению производительных сил Северного края. Т. 1. Недр. Архангельск: Сев. кр. изд., 1933. С. 16—36.
- Chernov A. A. Geological survey of the Pechora region and the problem of its subsoil. Proceedings of the Second Conference on the Study of the Productive Forces of the Northern Territory, V. 1, Subsoil, Arkhangelsk: Northern Regional Publishing House, 1933, pp. 16—36. (in Russian)
- Чернов А. А., Чернов Г. А. Геологическое строение бассейна р. Косью в Печорском крае: Отчет геол. отряда



- Печорск. компл. эксп. СОПС АН СССР. 1935 г. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1940. 102 с.
- Chernov A. A., Chernov G. A. Geological structure of the Kosyu River basin in the Pechora region. Report of the geological detachment of the Pechora complex. exp. SOPS AS USSR, 1935. Moscow, Leningrad: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1940, 102 p. (in Russian)
- Шабалин И. В.* Ухтинский нефтеносный район и его пути сообщения с центром России: Докл. (чит. 25 нояб. 1908 г. в Актовом зале Ин-та инж. пут. сообщ.) СПб.: Тип. Ю.Н. Эрлих, 1909. 34 с.
- Shabalin I. V. Ukhta oil region and transportation with central Russia: Report (on 25 Nov. 1908 in the Institute of engineering and transportation). St. Petersburg: Yu. N. Erlich Publishers, 1909, 34 p. (in Russian)
- Шмальгаузен И. Ф.* Об исследовании отпечатков растений из Печорского края и с Нижней-Тунгуски // Тр. СПб. об-ва естествоисп. СПб.: Тип. В. Демакова. 1879. Т. 10. С. 52—54.
- Schmalhausen I. F. On the research of plants prints from the Pechora region and the Lower Tunguska region. Proc. St. Petersburg natural sc. soc., St. Petersburg: V. Demakov Publishers, 1879, V. 10, pp. 52—54. (in Russian)
- Яворский В. И., Бутов П. И.* Материалы для геологии Кузнецкого каменноугольного бассейна. Юго-западная окраина бассейна. Л.: Геол. ком., 1922. 58 с. (Материалы по общей и прикладной геологии; Вып. 48).
- Yavorsky V. I., Butov P. I. Materials for the geology of the Kuznetsk coal basin. Southwestern margin of the basin. South-Western margin of the basin. Leningrad: Geological Committee, 1922, 58 p. (Materials on general and applied geology, 48) (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 22.01.2024



Примесный состав берилла из сподуменовых пегматитов месторождения Пашки (провинция Нуристан, Афганистан)

С. Г. Скублов^{1,2}, Н. Хамдард², М. А. Иванов², А. К. Гаврильчик², В. С. Стативко^{2,1}

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург
skublov@yandex.ru

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург
nazifullahhandard@gmail.com, ivanov_ma@pers.spmi.ru

Методом SIMS (масс-спектрометрии вторичных ионов) определен примесный состав кристаллов берилла (аквамарина) из пегматитов литиевого месторождения Пашки (провинция Нуристан, Афганистан). Выполнено 12 локальных определений содержания 20 химических элементов (включая галогены и воду). В сравнении с аквамарином из редкометалльных, в том числе и сподуменовых пегматитов других регионов мира, изученный берилл существенно обогащен крупноионными литофильными элементами: Li (порядка 1100 ppm), Na (4500 ppm) и K (300 ppm). Высокие концентрации щелочных элементов в составе берилла из литиевых пегматитов рассматриваются в качестве генетического признака высокого потенциала щелочей, создающегося в процессе кристаллизации ассоциирующего с бериллом сподумена и других литиевых минералов. Эта известная генетически обусловленная особенность берилла, характерная для продуктивных литиевых пегматитов, перспективна для использования при разработке поисковых и оценочных критериев литиевых пегматитов Нуристана и других пегматитовых провинций.

Ключевые слова: месторождение Пашки, берилл, аквамарин, сподуменовые пегматиты, метод SIMS, редкие элементы, поисковые и оценочные критерии

Impurity composition of beryl from spodumene pegmatites of Pashki deposit (Nuristan province, Afghanistan)

S. G. Skublov^{1,2}, N. Hamdard², M. A. Ivanov², A. K. Gavrilchik², V. S. Stativko^{2,1}

¹ Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

² St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg

The SIMS method (secondary ions mass-spectrometry) determined the impurity composition of a beryl crystals (aquamarine) from the pegmatites of the Pashki lithium deposit (Nuristan province, Afghanistan). 12 local determinations of the content of 20 chemical elements (including halogens and water) were performed. In comparison with aquamarine from rare metals, including spodumene pegmatites from other regions of the world, the studied beryl is significantly enriched with large ion lithophile elements: Li (about 1100 ppm), Na (4500 ppm) and K (300 ppm). High concentrations of alkaline elements in the beryl of lithium pegmatites are considered as a genetic sign of the high potential of alkalis created during the crystallization of spodumene associated with beryl and other lithium minerals. This well-known genetically determined feature of beryl, characteristic of productive lithium pegmatites, therefore is promising in the development of search and evaluation criteria for lithium pegmatites of Nuristan and other pegmatite provinces.

Keywords: Pashki deposit, beryl, aquamarine, spodumene pegmatites, SIMS method, trace elements, search and evaluation criteria

Введение

Тема востребованности и дефицитности литиевого сырья в настоящее время настолько актуальна, что безоговорочно ее можно отнести к числу наиболее глубоко исследованных сторон экономического, промышленно-технологического и ресурсного состояния минерально-сырьевых баз России и других стран. Хорошо известно, что на фоне грядущего истощения запасов активно разрабатываемых вулканогенных месторождений литиевого сырья интерес к таким рудным объектам, как литиевые (сподуменовые) пегматиты, возрастает.

Афганистан обладает крупными пегматитовыми месторождениями лития, пространственно и генети-

чески связанными с гранитами третьей фазы комплекса Лагман мел-палеогенового возраста. Редкометалльные пегматиты LCT-типа (специализированные на Li, Cs и Ta), к которым относятся сподуменовые пегматиты, широко представлены в восточной части страны, в основном в провинции Нуристан (Benham, Coats, 2007). Существенный вклад в их открытие и последующее исследование внесли советские геологи в 70-е годы XX века (Rossovskiy, Chmyrev, 1977). Однако комплексное минералого-геохимическое исследование этих рудных объектов не проводилось. В данной статье представлены некоторые результаты полевых работ, выполненных в 2023 г. Н. Хамдардом в провинции Нуристан на практически неизученном месторождении Пашки, где

Для цитирования: Скублов С. Г., Хамдард Н., Иванов М. А., Гаврильчик А. К., Стативко В. С. Примесный состав берилла из сподуменовых пегматитов месторождения Пашки (провинция Нуристан, Афганистан) // Вестник геонаук. 2024. 2 (350). С. 46–50. DOI: 10.19110/geov.2024.2.5

For citation: Skublov S. G., Hamdard N., Ivanov M. A., Gavrilchik A. K., Stativko V. S. Impurity composition of beryl from spodumene pegmatites of Pashki deposit (Nuristan province, Afghanistan). 2024, 2 (350), pp. 46–50, doi: 10.19110/geov.2024.2.5

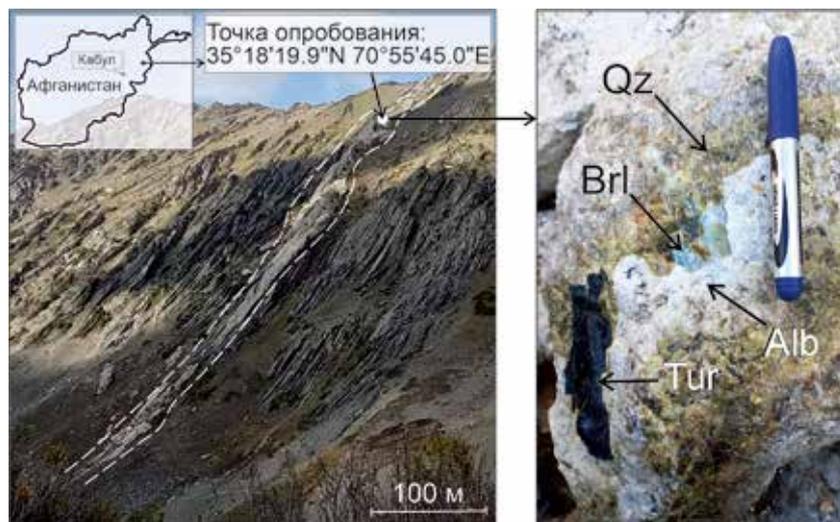


Рис. 1. Фотографии пегматитовой жилы месторождения Пашки и кристаллов аквамарина в пегматите (длина маркера примерно 15 см). Обозначения минералов: Brl — берилл (аквамарин), Tur — турмалин (шерл), Qz — кварц. На врезке показано положение месторождения

Fig. 1. Images of the pegmatite vein of the Pashki deposit and aquamarine crystals in pegmatite (marker length is approximately 15 cm). Mineral designations: Brl — beryl (aquamarine), Tur — tourmaline (sherl), Qz — quartz. The inset shows the position of the deposit

в одной из жил сподуменовых пегматитов впервые были обнаружены крупные кристаллы голубого берилла — аквамарина (рис. 1).

Берилл — типичный минерал редкометалльных, в том числе и литиевых пегматитов. В трудах отечественных и зарубежных геологов середины и конца XX века (А. И. Гинзбург, Н. А. Солодов, Б. М. Шмакин, E. N. Cameron, R. N. Jahns и другие) особенности примесного состава берилла рассмотрены в качестве генетически обусловленного типоморфного признака для пегматитов разной минералогической специализации — мусковитовой, бериллиевой и литиевой. В настоящее время в связи с развитием новых методов высокоточного определения химического состава минерального вещества, пришедших на смену прежним, менее точным методам, наметился переход на более достоверные и статистически обоснованные геохимические показатели проявлений типоморфизма минералов. Поэтому то, что раньше в закономерности изменения примесного состава берилла в пегматитах отмечалось лишь как тенденция, в настоящее время может быть выражено более достоверно и с высокой точностью.

Примером реализации нового подхода может служить изучение состава берилла из Шонгуйского месторождения редкометалльных пегматитов (Кольская провинция) с развитой, как считалось ранее, Li-Ta-Nb-минерализацией. Высокоточным методом SIMS в берилле из этого месторождения было установлено повышенное содержание щелочных металлов, что позволило пересмотреть прежние представления и обоснованно отнести данные пегматиты к Li-Cs-Na-типу (Morozova et al., 2023).

Главной задачей настоящей статьи является представление результатов высокоточного определения содержания элементов-примесей в берилле, обнаруженном в пегматитах литиевого месторождения Пашки, для их использования в качестве количественно выраженного типохимического признака проявления в пегматитах сподуменовой минерализации.

Геологическая характеристика месторождения

Месторождение Пашки находится в пределах Парунского пегматитового поля, в горах, на высоте от 3000 до 4300 м. Здесь на площади 2×3.5 км среди ме-

таморфических пород кашмундской серии верхнего триаса — кристаллических сланцев, кварцитопесчаников и мраморизованных известняков — обнажена серия протяженных (до 1 км и более при мощности до нескольких десятков метров) крутопадающих пегматитовых тел северо-восточного простирания с богатой сподуменовой минерализацией.

Состав рудоносных пегматитов указанного месторождения — кварц-сподумен-микроклин-альбитовый. В его пределах пегматиты представлены двумя сравнительно крупными телами: жилами № 1, 3 и жильной зоной № 2, имеющей вид «сетчатого» сочленения множества разноориентированных жильных форм. Предварительно оцененные запасы месторождения до глубины 100 м составляют 127 тыс. т Li₂O (Benham, Coats, 2007).

Жила № 3, в которой были обнаружены кристаллы аквамарина, имеет штокообразную форму и залегает преимущественно согласно вмещающим породам (тонкослоистым гранатовым и ставролитовым кварцбиотитовым сланцам). Она простирается на 600 м, мощность от 2 до 8 м. Характерно широкое распространение сахаровидных агрегатов мелкокристаллического альбита. На участках блоковой и пегматоидной структуры часто встречается турмалин (шерл и эльбаит), кристаллы которого достигают в длину 5×10 см.

В верхней (головной) части жилы № 3 обычно можно наблюдать мелкие кристаллы берилла длиной до 1—2 см. Крупные кристаллы прозрачного берилла (аквамарина нежно-голубого оттенка), исследованию состава которых посвящена данная статья, были обнаружены в этой жиле (абсолютная отметка 3800 метров) в ассоциации со сподуменом, микроклином, альбитом (клевеландитом), танталитом и полихромным турмалином (рис. 1).

Методы исследования

Три фрагмента кристаллов аквамарина из разных зерен размером около 1 см каждый были помещены в стандартный препарат (шайбу) вместе с зерном оливина, необходимого для оценки фона при анализе содержания летучих компонентов. Анализ состава берилла выполнялся на ионном зонде Cameca IMS-4f в Ярославском филиале ФТИАН им. К. А. Валиева РАН (аналитики Е. В. Потопов и С. Г. Симакин). На каждом

фрагменте равномерно по площади отполированной поверхности было выполнено по 4 анализа на 20 компонентов (табл. 1).

Методика измерения содержания малых и редких элементов, включая летучие компоненты (воду и галогены), подробно изложена в работе С. Г. Скублова с соавторами (2022). Точность определения составляет 10–15 % для элементов с концентрацией > 1 ppm и 10–20 % для элементов с концентрацией 0.1–1 ppm. Предел обнаружения определен как 5–10 ppb. Диаметр аналитического кратера порядка 20 мкм.

Обсуждение результатов

Данные по примесному составу изученного аквамарина (табл. 1) были сопоставлены с составом аквамарина из редкометалльных пегматитов различных регионов мира: Ильменского комплекса, Вьетнама, Ойгаинского месторождения (Киргизия), Алтая (Китай), Мозамбика и Мадагаскара (16 анализов, неопубликованные данные С. Г. Скублова и А. К. Гаврильчик); Ямранга (Восточный Непал) (50 анализов, Bhandari et al., 2023); месторождения Калифорния Блю Майн (США) (169 анализов, Pauly et al., 2021); Центральных Альп (Италия) (6 анализов, Vocchio et al., 2009); Коктогая (Китай), Минас-Жерайс (Бразилия) и Ноумас (Южная Африка) — всего 51 анализ (Cui et al., 2023); района Хунянь, Китай (2 анализа, Jiang et al., 2023).

На диаграмме соотношения содержания Li и Cs (рис. 2, а) аквамарин из месторождения Пашки отличается от аквамарина из других редкометалльных пег-

матитовых объектов повышенным содержанием Li (среднее (медианное) содержание 1097 ppm) и умеренным содержанием Cs (в среднем 260 ppm). В целом содержание Li в аквамарине из редкометалльных пегматитов может варьировать в очень широком диапазоне (по опубликованным работам и данным авторов) — от 60 до 2000 ppm. Ранее было установлено (Скублов и др., 2022), что среднее (медианное) содержание Li в аквамарине различного генезиса составляет около 200 ppm. Содержание Li в аквамарине из месторождения Пашки превышает это значение более чем в пять раз. Более высокое содержание Li, в среднем на уровне 4000–5000 ppm, установлено только для воробьевита из сподуменовых пегматитов Кольского п-ова (Скублов и др., 2022; Morozova et al., 2023). По содержанию Cs аквамарин из месторождения Пашки соответствует аквамарину из редкометалльных пегматитов комплекса Эронго (Намибия) (в среднем 331 ppm, Lum et al., 2016).

По соотношению щелочей (Na и K) аквамарин из месторождения Пашки демонстрирует повышенное содержание этих элементов (рис. 2, b) — содержание Na в среднем 4548 ppm, K — 309 ppm. Заметно более высокое содержание Na (на уровне 8500–9000 ppm) и K (600–650 ppm) было установлено для аквамарина из пегматитов Ноумас, Южная Африка, Cui et al., 2023). Если сравнивать с воробьевитом из сподуменовых пегматитов Кольского п-ова, то последний отличается более высоким содержанием Na (более 19 000 ppm) и схожим уровнем содержания K (Morozova et al., 2023).

Аквамарин из месторождения Пашки также выделяется повышенным содержанием Ca и Ti (рис. 2, с).

Таблица 1. Редкоэлементный состав (ppm) аквамарина из месторождения Пашки
Table 1. Trace element composition (ppm) of aquamarine from the Pashki deposit

Компонент Component	Фрагмент 1 / Fragment 1				Фрагмент 2 / Fragment 2				Фрагмент 3 / Fragment 3			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Li	1129	1102	1091	952	1046	911	963	949	1243	1270	1342	1996
Cs	347	173	293	278	162	225	267	146	309	252	226	396
Na	5101	4224	4411	4355	4274	4833	4830	3940	4474	4622	5506	6025
K	344	280	338	309	275	336	301	244	397	309	365	193
Rb	48.8	37.1	39.4	39.8	34.9	40.9	37.4	27.7	37.0	40.5	44.9	41.0
Sr	0.64	0.58	1.45	1.45	1.21	1.43	1.08	1.23	3.60	1.14	0.97	0.99
Ca	111	116	166	148	156	202	128	143	245	148	164	129
Mg	444	471	500	479	502	547	538	301	481	344	332	249
Fe	2968	2714	2691	2614	2315	2648	2752	1718	2827	2339	2559	2147
Mn	79.3	84.5	94.5	90.6	87.4	102	94.7	86.8	115	91.1	106	86.7
Ti	73.5	140	189	179	153	170	108	112	581*	119	248	85.2
V	1.15	1.41	1.47	1.25	1.16	1.38	1.17	0.90	2.62	1.11	1.35	1.16
Cr	16.4	22.9	66.3	61.4	51.2	75.4	44.0	52.3	44.3	47.4	47.3	39.9
Co	1.88	1.58	2.62	1.96	1.46	2.17	1.60	1.54	1.56	1.52	1.61	1.39
Sc	21.2	8.26	5.88	4.51	3.98	4.81	4.28	3.90	9.14	3.07	3.76	3.06
Ga	11.0	6.20	6.94	6.69	5.68	6.87	6.23	5.70	8.22	6.01	6.95	5.67
B	0.49	0.48	0.53	0.49	0.53	0.49	0.54	0.68	0.90	0.58	0.57	0.63
F	9.39	9.25	14.4	15.7	23.5	19.3	6.70	15.6	20.3	17.8	31.0	18.3
Cl	2210	2292	2402	1992	2359	2057	1947	1921	2897	2595	2804	3973
H ₂ O	36608	34710	33364	29926	32731	29563	32530	31735	29378	31011	30845	30677

Примечание: звездочкой отмечено содержание Ti, связанное с захватом микровключения.
 Note: an asterisk marks Ti content associated with micro-inclusion capture.

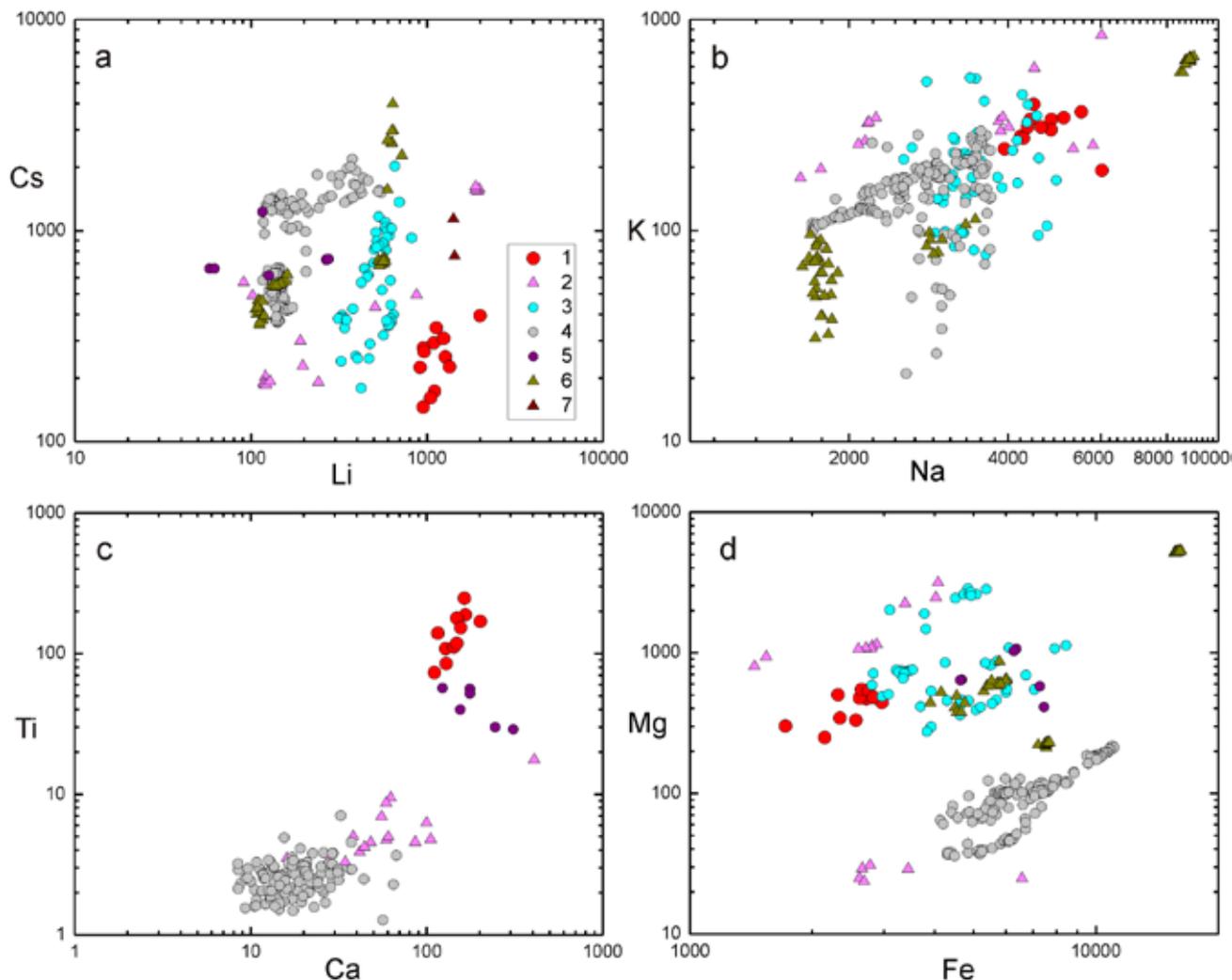


Рис. 2. Соотношение содержания редких элементов (ppm) в аквамарине из месторождения Пашки: а — Li-Cs; б — Na-K; с — Ca-Ti; д — Fe-Mg. Показан состав аквамарина: 1 — месторождения Пашки; 2–7 — редкометалльных пегматитов мира: 2 — Мозамбика и Мадагаскара; 3 — Ямранга (Восточный Непал) (Bhandari et al., 2023); 4 — месторождения Калифорния Блю Майн (США) (Pauly et al., 2021); 5 — Центральных Альп (Италия) (Bocchio et al., 2009); 6 — Коктогая (Китай), Минас-Жерайс (Бразилия) и Ноумас (Южная Африка) по (Cui et al., 2023); 7 — района Хуньянь (Китай) (Jiang et al., 2023)

Fig. 2. Ratio of content of trace elements (ppm) in aquamarine from the Pashki deposit: а — Li-Cs; б — Na-K; с — Ca-Ti; д — Fe-Mg. The composition of aquamarine is shown from: 1 — Pashki deposit; 2–7 — trace metal pegmatites of the world: 2 — Mozambique and Madagascar; 3 — Yamrang pegmatites (Eastern Nepal) (Bhandari et al., 2023); 4 — California Blue Mine deposits (USA) (Pauly et al., 2021); 5 — pegmatites of the Central Alps (Italy) (Bocchio et al., 2009); 6 — pegmatites of Coctogai (China), Minas Gerais (Brazil) and Noumas (South Africa) by (Cui et al., 2023); 7 — pegmatites of Hunyan district (China) (Jiang et al., 2023)

Среднее содержание Ca составляет в нем 148 ppm, Ti — 140 ppm (за исключением точки 9, табл. 1). По содержанию Ca ему соответствует аквамарин из пегматитов Центральных Альп (Италия) со средним содержанием 198 ppm, но в нем содержание Ti в разы ниже — 44 ppm (Bocchio et al., 2009). Содержание этих элементов в аквамарине из редкометалльных пегматитов комплекса Эронго (Намибия) заметно ниже — на уровне 60–80 ppm (Lum et al., 2016). При этом изучаемый аквамарин отличается пониженным содержанием Fe (в среднем 2631 ppm) по сравнению с аквамаринами из других редкометалльных пегматитов (рис. 2, d). Содержание Mg (в среднем 475 ppm), напротив, соответствует средним значениям для аквамарина из редкометалльных пегматитов.

Аквамарин из месторождения Пашки в сравнении с аквамаринами из редкометалльных пегматитов ком-

плекса Эронго отличается повышенным содержанием Cr (в среднем 47 и 5 ppm соответственно) и Mn (91 и 31 ppm) и пониженным — Sc (4 и 51 ppm). Среднее содержание Rb в аквамарине из месторождения Пашки примерно соответствует содержанию, установленному для редкометалльных пегматитов (40–60 ppm). Более высоким содержанием Rb отличается аквамарин месторождения Калифорния Блю Майн (в среднем 113 ppm, Pauly et al., 2021) и пегматитов Мозамбика (в среднем 143 ppm, данные авторов).

Количество Mn (в среднем 91 ppm) в аквамарине из месторождения Пашки соответствует аквамарину из различных типов пегматитов и грейзенов (Скублов и др., 2022).

По содержанию воды (в среднем 31 373 ppm) аквамарин из месторождения Пашки ближе к воробьевиту (в среднем 33 981 ppm), чем к среднему составу



аквамарины (19 978 ppm, Скублов и др., 2022). Аналогично, у аквамарина из месторождения Пашки гораздо выше содержание Cl (в среднем 2326 ppm, по сравнению с 493 ppm). Содержание F находится на сходном уровне (17 и 11 ppm соответственно).

Выводы

Характерной особенностью химического состава изученного берилла (аквамарины) из сподуменовых пегматитов месторождения Пашки является существенное обогащение такими крупноионными литофильными элементами, как Li (в среднем 1100 ppm), Na (4500 ppm) и K (300 ppm), а также водой (порядка 30 000 ppm). Это позволяет отнести его к бериллам щелочного (натриево-литиевого) типа с предполагаемым гетеровалентным изоморфизмом: $\text{Li}^+ + (\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Rb}^+, \text{Cs}^+) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Be}^{2+} + \text{вакансии в каналах}$.

Бериллы такого типа относятся к числу типоморфных для литиевых пегматитов и в ассоциации со сподуменом, полихромным турмалином (эльбаитом), альбитом и другими минералами свидетельствуют о достижении высокого потенциала Li, Na, K в водонасыщенной системе образования этих пород. В данном случае аквамарин характеризуется аномально высокой щелочностью (содержанием Li и Na), что позволяет использовать его в качестве важных поисково-оценочных признаков высокой продуктивности пегматитовых тел на литиевое сырье.

Авторы благодарны С. Г. Симакину и Е. В. Потапову (ЯФ ФТИАН РАН) за проведение аналитических исследований.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГГД РАН FMUW-2022-0005.

Литература / References

Скублов С. Г., Гаврилчик А. К., Березин А. В. Геохимия разновидностей берилла: сравнительный анализ и визуализация аналитических данных методами главных компонент (PCA) и стохастического вложения соседей с t-распределением (t-SNE) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 455–469. DOI: 10.31897/PMI.2022.40

Skublov S. G., Gavrilchik A. K., Berezin A. V. Geochemistry of beryl varieties: comparative analysis and visualization of analytical data by principal component analysis (PCA) and t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE). *Journal of Mining Institute*, 2022, V. 255, pp. 455–469.

Benham A. J., Coats S. Minerals in Afghanistan: rare-metal deposits. Afghanistan Geological Survey website. 2007. (<https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/10924>)

Bhandari S., Qin K., Zhou Q., Evans N. J., Gyawali B. R., He C., Sun Z. Magmatic-hydrothermal evolution of the aquamarine-bearing Yamrang Pegmatite, Eastern Nepal: Insights from beryl, garnet, and tourmaline mineral chemistry. *Ore Geol. Rev.*, 2023, V. 162, 105713. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105713

Bocchio R., Adamo, I., Caucia F. Aquamarine from the Masino-Bregaglia Massif, Central Alps, Italy // *Gems & Gemology*. 2009. Vol. 45. No. 3. P. 204–207.

Cui S., Xu B., Shen J., Miao Z., Wang Z. Gemology, spectroscopy, and mineralogy study of aquamarines of three different origins // *Crystals*. 2023. Vol. 13. 1478. DOI: 10.3390/cryst13101478

Jiang Y., Li J., Li P., Cai Y., Zhang L. Geochemical and spectroscopic features of beryl (aquamarine) from Renli No. 5 pegmatite in Hunan, Central China // *Minerals*. 2023. Vol. 13. 336. DOI: 10.3390/min13030336

Lum J.E., Viljoen F., Cairncross B., Frei D. Mineralogical and geochemical characteristics of BERYL (AQUAMARINE) from the Erongo Volcanic Complex, Namibia // *J. African Earth Sci.* 2016. Vol. 124. P. 104–125. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2016.09.006

Morozova L. N., Skublov S. G., Zozulya D. R., Serov P. A., Borisenko E. S., Solovjova A. N., Gavrilchik A. K. Li-Cs-Na-Rich beryl from beryl-bearing pegmatite dike No. 7 of the Shongui deposit, Kola Province, Russia // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. 309. DOI: 10.3390/geosciences13100309

Pauly C., Gysi A. P., Pfaff K., Merkel I. Beryl as indicator of metasomatic processes in the California Blue Mine topaz-beryl pegmatite and associated miarolitic pockets. *Lithos*, 2021. 404, 106485. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106485

Rossovskiy L. N., Chmyrev V. M. Distribution patterns of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan) // *Int. Geol. Rev.* 1977. Vol. 19. Iss. 5. P. 511–520. DOI: 10.1080/00206817709471047

Поступила в редакцию / Received 31.01.2024



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

День российской науки – 2024 в Институте геологии

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина открыл свои двери в День российской науки для всех желающих, прежде всего для молодого поколения. В этом году наиболее активно в акции участвовали школы и организации среднего образования. Особо популярным было посещение семейными группами. Число гостей превысило 450 человек. В прошлом году дополнительно проводились мастер-классы и лекции, что привлекло большое количество посетителей. Активность экскурсантов в 2024 году обусловлена новыми экспонатами и выставками.

Большой интерес гостей вызвала экспозиция «Перспективные разработки в решении проблем комплексного использования минерального сырья Республики Коми», презентованная сотрудниками лаборатории технологии минерального сырья.

— В первую очередь это титановые и алюминиевые руды, цеолитсодержащие породы. Горнопромышленные отходы также активно вовлекаются в промышленное производство, — рассказал младший научный сотрудник лаборатории аспирант Алексей Понарядов (фото 1).



Фото 1. М. н. с. А. Понарядов даёт интервью журналисту БНК

Photo 1. Junior Researcher A. Ponaryadov gives an interview to BNK journalist

Среди достижений последних лет — не только новые промышленные продукты вроде нанотрубок из труднообогатимой составляющей титановых руд или теплоизоляционной керамики из бедного алюминиевого сырья, но и удобрение, улучшающее качество и повышающее урожай картофеля.

The Day of Russian Science – 2024 in the Institute of geology

February 8, 2024 marks the Day of Russian Science. The Institute of geology, named after Academician N. P. Yushkin, opened doors to everyone interested guests, especially to the younger generation. The "Open Doors Day" event was held on the basis of the A. A. Chernov Geological Museum. The employees of the Laboratory of Mineral Raw Technology presented the exhibition "Advanced developments to solve problems of Integral Use of Mineral Raw of the Komi Republic".

Новая экспозиция «Высокоуглеродистые битумы. Провинция Сычуань, Китай» (High-carbon bitumen. Sichuan Province, China) была открыта ко Дню науки в зале учёного совета (фото 2). Образцы коллекции были отобраны во время полевого выезда на рудник Баймулин-Линьхуа (провинция Сычуань) (см. «Вестник геонаук» № 10, 2023), организованного в августе 2023 года нашими китайскими коллегами (Dr. Shiyong SUN and Dr. Yuyin ZHU) в рамках совместного проекта РФ-НСФС и Соглашения об образовательном и научном сотрудничестве между Институтом геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Юго-Западным научно-техническим университетом (Китай) и СГУ им. Питирима Сорокина, подписанным в 2019 году.



Фото 2. Выставка «Высокоуглеродистые битумы. Провинция Сычуань, Китай» (High-carbon bitumen. Sichuan Province, China)

Photo 2. Exhibition "High-carbon bitumen. Sichuan Province, China"

Традиционно гостям музея представилась возможность как самостоятельно ознакомиться с экспозициями музея, так и присоединиться к организованным группам с экскурсионным сопровождением. Посетителям доступны тринадцать выставочных залов (полезные ископаемые; минералогия; литология;



Фото 3. Посетители в зале «Палеонтология»
Photo 3. Visitors in the "Paleontology" hall



Фото 5. Гости музея знакомятся с экспозицией «Строение земной коры и развитие органического мира на северо-востоке европейской части России»
Photo 5. Guests of the museum observe the exposition "Structure of the earth crust and development of the organic world in the northeast of the European part of Russia"



Фото 4. М. н. с. К. С. Попвасев проводит экскурсию в зале «Полезные ископаемые Европейского Севера России»
Photo 4. Junior Researcher K. S. Popvasev conducts an excursion in the "Minerals of the European North of Russia" hall

петрография, история геологических исследований, палеонтология и стратиграфия, камнесамоцветное сырьё и «Ноев ковчег» — частная коллекция А. П. Боровинских). Особый интерес вызывали образцы органических минералов, представленные в зале минералогии, а также камнесамоцветное сырьё, привлекающее блеском камней и игрой цвета. После реконструкции зала «Петрография» школьники с удивлением рассматривали в микроскопе шлифы (срезы горных пород). В палеонтологической экспозиции подолгу задерживались у обновленных витрин с остатками ихтиозавров и плезиозавров, рассматривали ископаемые остатки Медвежьей пещеры и животных, обитавших более 2 млн лет назад (мамонта, носорога, пещерных медведей и льва) (фото 3—5).

Акция «День российской науки» позволила жителям Сыктывкара окунуться в науку, познакомиться с направлениями исследований современной геологии и познавательно провести день.

**Зав. музеем, к. г.- м. н. И. С. Астахова,
д. г.-м. н. О. Б. Котова**

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

Компьютерная верстка
Т. В. Хазовой

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 29.03.2024. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 6,5. Тираж 140. Заказ 1221. 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 П. Безносова, А. Перетягина, Н. Уляшевой, А. Иевлева, Н. Сокеиной