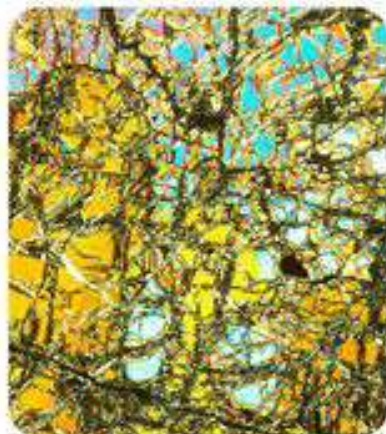


ISSN 2712-7761

№ 6 (366), июнь 2025



Вестник геонаук





Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Июнь
June
2025,
№ 6 (366)

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. Андреичева, Сыктывкар, Россия
А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
Т. М. Безносова, Сыктывкар, Россия
М. А. Богдасаров, Брест, Беларусь
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, Санкт-Петербург, Россия
А. Д. Гвишиани, Москва, Россия
В. А. Жемчугова, Москва, Россия
А. В. Журавлев, Сыктывкар, Россия
Д. А. Зедгенизов, Екатеринбург, Россия
В. А. Каширцев, Новосибирск, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия
Н. А. Малышев, Москва, Россия
М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия
Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия
П. Мянник, Таллин, Эстония
А. И. Николаев, Апатиты, Россия
Б. М. Осовецкий, Пермь, Россия
Ю. Ф. Патраков, Кемерово, Россия
И. В. Пеков, Москва, Россия
Д. В. Пономарев, Сыктывкар, Россия
Д. Ю. Пуцаровский, Москва, Россия
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
Ш. Сун, 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, St. Petersburg, Russia
A. D. Gvishiani, Moscow, Russia
V. A. Zhemchugova, Moscow, Russia
A. V. Zhuravlev, Syktyvkar, Russia
D. A. Zedgenizov, Yekaterinburg, Russia
V. A. Kashirtcev, Novosibirsk, Russia
M. Komac, Ljubljana, Slovenia
S. V. Krivovichev, St. Petersburg, Russia
S. K. Kuznetsov, Syktyvkar, Russia
N. A. Malyshev, Moscow, Russia
M. Martins, Ouro Preto, Brazil
T. P. Mayorova, Syktyvkar, Russia
P. Männik, Tallinn, Estonia
A. I. Nikolaev, Apatity, Russia
B. V. Osovetsky, Perm, Russia
Yu. F. Patravkov, Kemerovo, Russia
I. V. Pekov, Moscow, Russia
D. V. Ponomarev, Syktyvkar, Russia
D. Yu. Pushcharovsky, Moscow, Russia
A. M. Pystin, Syktyvkar, Russia
Sh. Sun, Mianyang, China
C. M. Soja, Hamilton, NY, USA
O. V. Udoratina, Syktyvkar, Russia
M. A. Fedonkin, Moscow, Russia
A. G. Shelomentsev, Yekaterinburg, Russia

Technical Editor G. N. Kablis

Managing Editor T. A. Nekuchaeva

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит ежемесячно. Основан в 1995 году
академиком Н. П. Юшкиным.

Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2023) – 0.540



geo.komisc.ru/vestnik

SCIENTIFIC JOURNAL

Monthly issued. Founded in 1995
by Academician N. P. Yushkin.

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Two-year RSCI
impact factor (2023) – 0.540

Содержание**Content**

Научные статьи	Scientific articles
Условия образования золотого оруденения в минерализованных зонах рудопоявления Ягодное по данным хлоритовой геотермометрии (кряж Манитанырд, Полярный Урал) <i>Т. П. Майорова, Л. И. Ефанова</i> 3	Conditions of gold mineralization formation in mineralized zones of the Yagodnoye ore occurrence based on chlorite geothermometry (Manitanyrd Ridge, Polar Urals) <i>T. P. Mayorova, L. I. Efanova</i> 3
Кремний в железомарганцевых образованиях Японского моря: особенности выделения и взаимоотношение с главными рудными фазами <i>Н. В. Астахова</i> 14	Silicon in ferromanganese crusts from the Sea of Japan: peculiarities of allocation and interrelation with main ore phases <i>N. V. Astakhova</i> 14
Литолого-палеогеографическое районирование Европейского Северо-Востока России и корреляции морен в пределах территориальных зон <i>Л. Н. Андричева</i> 24	Lithological-paleogeographical zonation of the European North-East of Russia and correlation of moraines within territorial zones <i>L. N. Andreicheva</i> 24
Новый род строматолитов из палеопротерозоя Карельского кратона <i>А. В. Лютиков, П. В. Медведев</i> 39	A new genus of stromatolites from the Paleoproterozoic of the Karelian craton <i>A. V. Lyutikov, P. V. Medvedev</i> 39
Хроника, события, факты	Chronicle, events, facts
Геология рифов — 2025. Итоги..... 49	Geology of reefs — 2025. Results..... 49

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting

geo.komisc.ru/vestnik/authors



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 553.2:550.836(234.851)

DOI: 10.19110/geov.2025.6.1

Условия образования золотого оруденения в минерализованных зонах рудопроявления Ягодное по данным хлоритовой геотермометрии (кряж Манитанырд, Полярный Урал)

Т. П. Майорова^{1,2}, Л. И. Ефанова¹¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия; gmin2004@mail.ru² СГУ им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия; mayorova@geo.komisc.ru

В золотоносной зоне рудопроявления Ягодное установлен характер метасоматических изменений вмещающих пород, химический состав хлорита и условия его образования. Минеральный состав и текстурно-структурные особенности метасоматитов позволяют отнести их к пропилитам эпидот-хлоритовой субфации. Микроскопическое описание шлифов выполнялось на оптическом микроскопе Nikon Eclipse LV 100 ND. Состав хлорита определен на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMH с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max. По химическому составу изученный хлорит соответствует клинохлору. Температура образования минерала оценена с помощью хлоритовой геотермометрии. Клинохлор (пикнохлорит), ассоциирующий с метакристаллами пирита, образовался в температурном интервале 306–235 °С. Клинохлор (пеннин) установлен только в виде единичных включений в пирите, существенно обогащен Si; температура его образования 185–157 °С. Тесная ассоциация хлорита с метакристаллами золотоносного пирита свидетельствует об их одновременном образовании в течение единого метасоматического процесса при 306–157 °С с пиком температуры 306–235 °С.

Ключевые слова: золоторудное проявление, минерализованная зона, клинохлор, хлоритовая геотермометрия, температура кристаллизации, кряж Манитанырд, Полярный Урал

Conditions of gold mineralization formation in mineralized zones of the Yagodnoye ore occurrence based on chlorite geothermometry (Manitanyrd Ridge, Polar Urals)

Т. П. Mayorova^{1,2}, L. I. Efanova¹¹ Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia² P. Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

The gold-bearing zone of the Yagodnoye ore occurrence was studied to determine the nature of metasomatic alterations in the host rocks, the chemical composition of chlorite, and the conditions of its formation. Metasomatites exhibit mineralogical and textural-structural characteristics typical of propylites from the epidote-chlorite subfacies. Petrographic analysis was conducted by Nikon Eclipse LV 100 ND optical microscope, while chlorite composition was determined via Tescan Vega 3 LMH scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments X-Max energy-dispersive spectrometer. The chemical composition of the studied chlorite corresponds to clinochlore. The temperature of mineral formation was estimated by a chlorite geothermometer. Clinochlore (pycnochlorite), associated with gold-bearing pyrite metacrystals, formed at 306–235 °C. Clinochlore (pennine) is found only in the form of single inclusions in pyrite, is significantly enriched in Si, and its formation temperature is 185–157 °C. The paragenetic association of chlorite with gold-bearing pyrite metacrysts suggests that both minerals were co-precipitated simultaneously during a single metasomatic process at 306–157 °C with a peak temperature of 306–235 °C.

Keywords: gold occurrences, mineralized zone, clinochlore, chlorite geothermometry, crystallization temperature, Manitanyrd ridge, Polar Urals

Введение

Минералы группы хлорита (Mg , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn , Al)₁₂ [$(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}$](OH)₁₆ широко распространены на месторождениях разных типов и часто тесно связаны с процессами рудообразования (Шафигуллина и др., 2020; Zang, Fyfe, 1995; Wang et al., 2022). Хлориты характеризуются широкими вариациями кристаллохимиче-

ского и химического состава, которые зависят от состава вмещающих пород и физико-химических условий образования, коррелируя с температурой, fugitivностью серы и кислорода (Martinez-Serrano, Dubois, 1998; Hydrous phyllosilicates..., 1991). В связи с этим хлорит широко используется как эффективный геотермометр для расчета температур образования ме-

Для цитирования: Майорова Т. П., Ефанова Л. И. Условия образования золотого оруденения в минерализованных зонах рудопроявления Ягодное по данным хлоритовой геотермометрии (кряж Манитанырд, Полярный Урал) // Вестник геонаук. 2025. 6(366). С. 3–13. DOI: 10.19110/geov.2025.6.1

For citation: Mayorova T. P., Efanova L. I. Conditions of gold mineralization formation in mineralized zone of the Yagodnoye ore occurrence based on chlorite geothermometry (Manitanyrd Ridge, Polar Urals). Vestnik of Geosciences, 2025, 6(366), pp. 3–13, doi: 10.19110/geov.2025.6.1

таморфических пород и гидротермальных преобразований, сопровождающих процессы рудообразования (Inoue, Kurokawa, Hatta, 2010; Cathelineau, Neiva, 1985; Cathelineau, 1988; Kranidiotis, MacLean, 1987; Jowett, 1991).

С целью выяснения условий формирования золотого оруденения, связанного с метасоматическими изменениями вмещающих пород в минерализованных зонах рудопоявления Ягодное, нами изучен петрографический состав вмещающих пород, химический состав хлоритов и определена температура их кристаллизации.

Геологическая ситуация

В центральной части кряжа Манитанырда в пределах линейно вытянутой тектонической структуры ССВ-простираения, названной Нияюской рудной зоной (Ефанова, 2020), расположены золоторудные проявления Нияхойское-1, Нияхойское-2, Ягодное, Верхненияюское-1, Верхнелекелеское и мелкое (по запасам) месторождение Верхненияюское-2, а также многочисленные пункты минерализации (рис. 1).

Ранее основное внимание уделялось изучению золотомышьяково-сульфидных проявлений кварцевожильного типа (месторождение Верхненияюское-2,

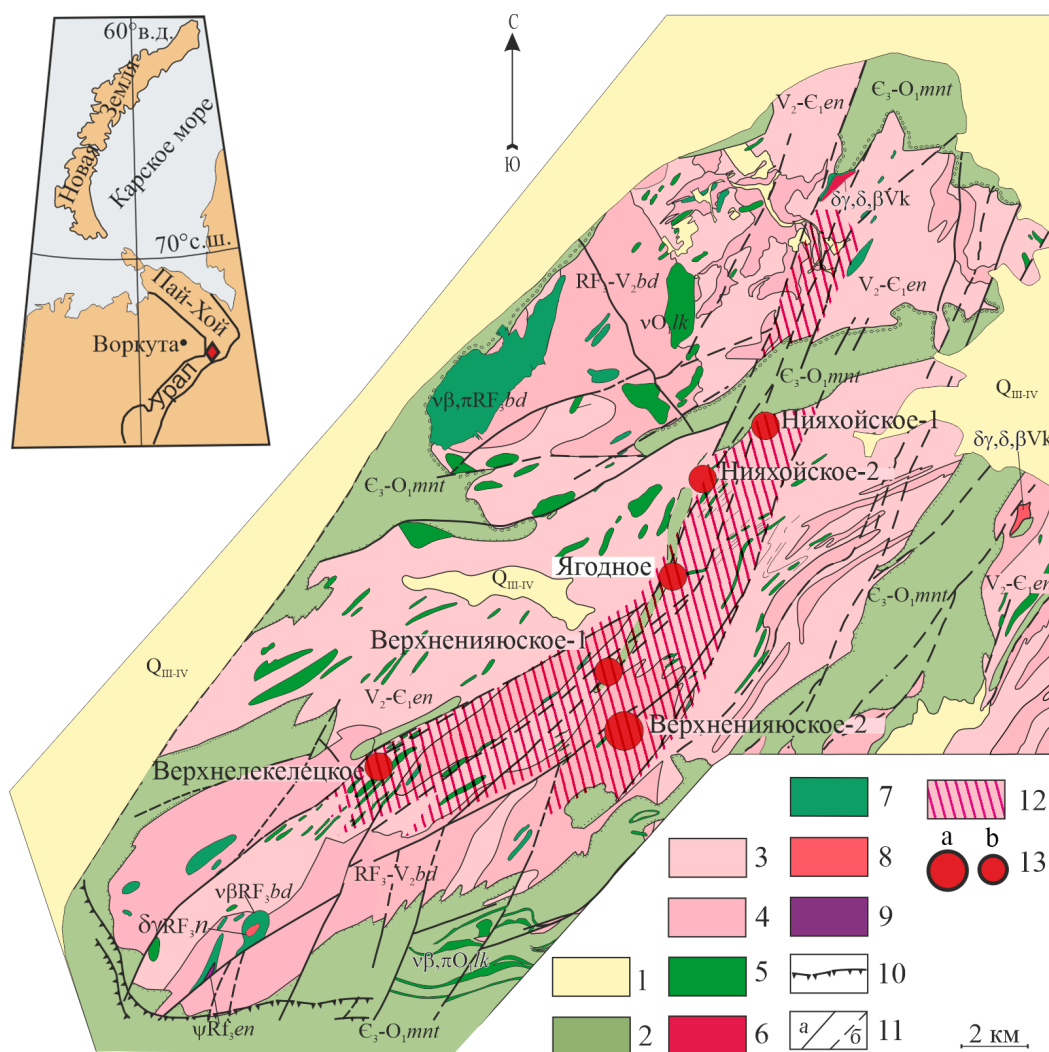


Рис. 1. Геологическое строение и золоторудные проявления Манитанырда (Государственная..., 2013 с дополнениями): 1 — четвертичные отложения; 2 — манитанырда серия нерасчлененная (верхний кембрий — нижний ордовик); 3 — энганепэйская* свита (верхний венд — нижний кембрий); 4 — бедамельская серия нерасчлененная (верхний рифей — венд). Интрузивные образования: 5 — леквозжский комплекс: оливиновые габбро и долериты, пикродолериты; 6 — кызыгейский комплекс: диориты, гранодиориты, плагиограниты; 7 — нижнебедамельский комплекс: габбро, габбро-долериты; 8 — нияюский комплекс: диориты, гранодиориты, плагиограниты; 9 — энганепэйский комплекс: серпентиниты апоперидотитовые, апиноксенитовые; 10 — тектонические покровы; 11 — разрывные нарушения: а — достоверные, b — предполагаемые; 12 — Нияюская рудная зона; 13 — золоторудные месторождения (а) и проявления (b)

Fig. 1. Geological structure and gold ore occurrences in the Manitanyrd region (State Geological Map..., 2013 with additions): 1 — Quaternary deposits; 2 — undivided Manitanyrd series (Upper Cambrian — Lower Ordovician); 3 — Enganepe suite (Upper Vendian — Lower Cambrian); 4 — undivided Bedamel series (Upper Riphean — Vendian). Intrusions: 5 — Lekvozhskey complex: olivine gabbro and dolerites, picrodolerites; 6 — Kyzgeyskii complex: diorites, granodiorites, plagiogranites; 7 — Lower Bedamel complex: gabbro, gabbro-dolerites; 8 — Niyayu complex: diorites, granodiorites, plagiogranites; 9 — Enganepe complex: serpentinites apoperidotite, apopyroxenite; 10 — overthrust nappes; 11 — faults: a — proved, b — probable; 12 — Niyayu ore zone; 13 — gold ore deposits (a) and occurrences (b)

* На геологической карте листа Q-41-V, VI масштаба 1 : 200 000 эта свита названа «энганэпэйская»



проявления Нияхойское-2, Верхнелекелецкое) (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001; Кузнецов и др., 2011; Майорова, Ефанова, 2019; Майорова и др., 2022). Однако в последние годы в Манитаньрдском районе выявлены зоны прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации во вмещающих породах (тип минерализованных зон), представляющие особый интерес для дальнейшего исследования, поскольку оценка их золотоносности позволяет увеличить ресурсный потенциал территории на коренное золото (Ефанова и др., 2020). Золоторудные объекты локализованы в позднерифейско-раннекембрийских вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах бедамельской серии и енганепэйской свиты, которые с угловым и стратиграфическим несогласием перекрыты более поздними образованиями палеозойского возраста. На рудопроявлениях кварцево-жильного типа околорудные изменения наиболее ярко проявлены в вулканитах основного состава и выражены ранней пропилитизацией, сопровождающейся появлением эпидот-актинолит-кварц-альбит-хлоритовых минеральных парагенезисов (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001). Рудная минерализация этого этапа представлена кварцевыми жилами с ранним пиритом и арсенопиритом с тонкодисперсным золотом. Позднее пропилитизированные породы подверглись кварц-серицитовому и кварц-серицит-карбонатному метасоматозу березит-лиственитовой формации, который сопровождался появлением наложенной сфалерит-галенитовой ассоциации с самородным золотом (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001).

Рудопроявление Ягодное расположено в среднем течении руч. Ниявож в районе его паукообразной развилки и локализуется в вулканогенно-осадочных породах енганепэйской свиты позднего венда – раннего кембрия. Оно обнаружено при заверке комплексной литогеохимической аномалии по вторичным ореолам рассеяния со средним содержанием Au 0.019 г/т и сопутствующими As, Mo, Pb, Ag. В штучных пробах, отобранных из элювиально-делювиальных щебнисто-мелкоглыбовых отложений с суглинистым заполнителем мощностью 0.8–2.0 м, содержание золота колебалось от следовых значений до 11.1 г/т. При оценке аномалии буровыми скважинами подсечены 2 зоны пиритизированных туфопесчаников и туфоалевролитов мощностью около 10 и 30 м. В них установлены интервалы с содержанием золота, достигающим промышленных значений. На поверхности минерализованная зона прослежена на протяжении около 200 м. Визуально она выделяется буровато-рыжей окраской пород, их высокой дислоцированностью, развитием участков катклаза и милонитизации. Рудная минерализация представлена вкрапленностью окисленного пирита, содержание которого не превышает 1–2 об. %.

В минерализованной зоне поисковый интерес представляет интервал мощностью 14.2 м, в котором среднее содержание золота составляет 0.6 г/т на истинную мощность 11.5 м, при вариациях от 0.15 до 1.11 г/т (рис. 2). Минералогическим анализом протоочных проб установлено наличие невесового золота в количестве от 1 до 21 знаков. Размер золотин — от 0.1×0.1 до 0.5×0.5 мм, они часто находятся в сростках с кварцем, а в зоне окисления — с гидроксидами железа.

Основное внимание в данной статье уделено золотоносному интервалу минерализованной зоны рудопроявления.

Материалы и методы

Во время полевых работ 2008 г. на рудопроявлении Ягодное отобраны бороздовые, точечные, задирыковые пробы (весом 5–12 кг), по которым проведен атомно-абсорбционный анализ на Au в Центральной лаборатории ЗАО «Миреко» (Сыктывкар). Последующие петрографические и минералогические исследования проводились в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Микроскопическое описание шлифов выполнялось на оптическом микроскопе Nikon Eclipse LV 100 ND. Состав минералов определялся в аншлифах на электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN (Tescan, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (аналитики Е. М. Тропников, А. С. Шуйский). Напряжение 20 кВ, ток пучка 30 нА, диаметр пучка 2 мкм, время набора спектров 60–80 сек (600 тыс. импульсов). В качестве стандартов использовались следующие эталоны: чистые металлы для Fe, Mn, Cr, Ti; оксиды для Mg, Al, Si; KBr для K; минералы — волластонит для Ca, SiO_2 для кислорода. Погрешность определения (мас. %): 0.15 — Fe, 0.1 — Mg, 0.1 — Al, 0.1 — Si, 0.05 — Mn, 0.1 — Ca; 0.04 — Cr, 0.04 — Ti.

Структурные формулы хлорита рассчитаны на основе $\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ (половина структуры — half-cell structure), а Fe рассматривается как Fe^{2+} (Zane, Weiss, 1998). Названия минералов группы хлорита приводятся в двух вариантах — по принятой в настоящее время номенклатуре (Bailey, 1980; Wiewiora, Weiss, 1990) и с указанием их специальных названий (по Hey, 1954), которые до сих пор широко используются в отечественной и зарубежной литературе. Для визуализации составов хлорита и температур его образования также использована классификационная диаграмма Si — (Fe/Fe+Mg) (Hey, 1954).

Оценка температурного режима отложения хлорита выполнена с использованием данных для эмпирического хлоритового геотермометра, основанного на количестве тетраэдрического алюминия (Al^{IV}) и мольной доле железа $X(\text{Fe})$, между которыми была установлена линейная зависимость от температуры (Cathelineau, Neiva, 1985; Cathelineau, 1988). Затем этот хлоритовый геотермометр был модифицирован с учетом поправки на повышение температуры при высоком соотношении (Fe/Fe+Mg) (Kranidiotis, MacLean, 1987; Jowett, 1991). Кроме того, А. Р. Котельниковым с соавторами (2012) проведена экспериментальная калибровка хлоритового геотермометра (Cathelineau, Neiva, 1985) при температуре 200–250 °C, $P = 0.5$ кбар и для оценки температур предложены два уравнения, применимые в интервале 150–300 °C, одно из которых также использовано в нашей работе.

Полученные данные по химическому составу хлоритов рудопроявления Ягодное показывают, что они относятся к маложелезистым разновидностям, поэтому для расчета температуры их образования мы использовали следующие геотермометры (Cathelineau, 1988; Jowett, 1991; Котельников и др., 2012). Формулы для расчета температур приведены в таблице 1.

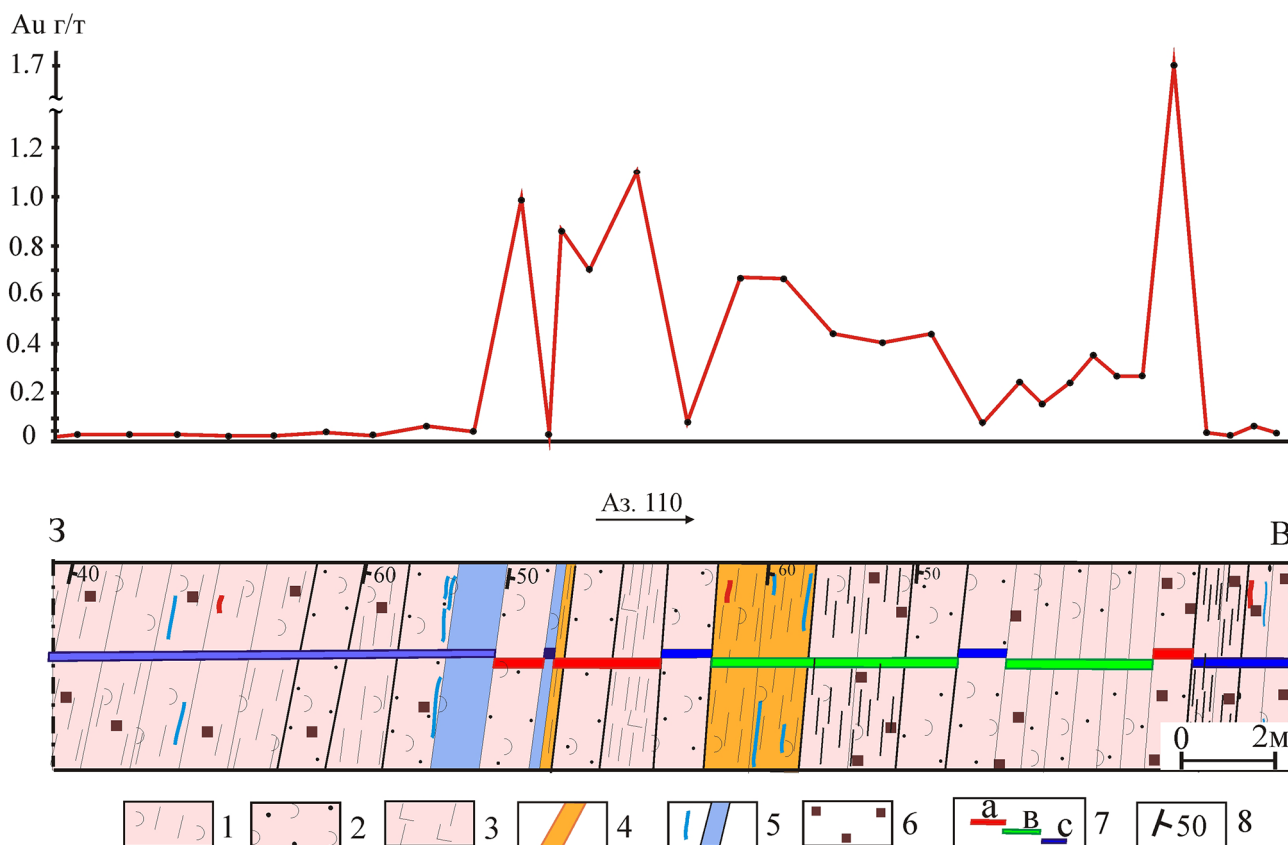


Рис. 2. Минерализованная зона рудопоявления Ягодное и распределение содержаний золота по результатам бороздочного опробования: 1–3 — катаклазированные туфоалевросланцы (1), туфопесчаники (2), ортосланцы по вулканогенным породам основного состава (3); 4 — зоны лимонитизации; 5 — кварцевые жилы и прожилки; 6 — лимонитизированный пирит; 7 — место отбора проб; цветом показано содержание Au: красным — 0.7–1.7 г/т; зеленым — 0.2–0.6 г/т; синим — 0.02–0.08 г/т; 8 — элементы залегания сланцеватости

Fig. 2. Mineralized zone of the Yagodnoye ore occurrence and distribution of gold grades based on channel sampling results: 1, 2, 3 — cataclastic tuff siltstones (1), tuff sandstones (2), orthoschists on volcanic rocks of basic composition (3); 4 — limonitization zones; 5 — quartz veins and veinlets; 6 — limonitized pyrite; 7 — sampling location; Au grade is shown in color: red — 0.7–1.7 g/t; green — 0.2–0.6 g/t; blue — 0.02–0.08 g/t; 8 — schistosity bedding elements

Таблица 1. Формулы для расчета температур образования хлоритов

Table 1. Formulas for calculating the temperatures of chlorite formation

$T_1, ^\circ\text{C} = -61.92 + 321.98 \text{ Al}^{\text{IV}}$	(Cathelineau, 1988)
$T_2, ^\circ\text{C} = 319 \text{ Al}^{\text{IV}} \text{ cor} - 69$, где $\text{Al}^{\text{IV}} \text{ cor} = \text{Al}^{\text{IV}} + 0.1(\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg}))$	(Jowett, 1991)
$T_3, ^\circ\text{C} = 39.73 + 180.64 * \text{Al}^{\text{IV}} (\pm 15)$	(Котельников и др., 2012)

Результаты

Породы минерализованной зоны рудопоявления Ягодное представлены туфоалевросланцами (70 %), среди которых присутствуют единичные (1–2 м) прослои туфопесчаников (10–30 %) и ортосланцев по вулканогенным породам основного состава (5 %, мощностью 4–5 м). Многочисленные прожилки мощностью 0.2–0.3 м, редко 0.9–1 м выполнены ожелезненным молочно-белым кавернозным кварцем с ксенолитами вмещающих пород. В зальбандах прожилков встречаются эпидот и хлорит.

Золотоносный интервал приурочен к пиритизированным актинолит-хлорит-серицит-альбитовым ортосланцам (рис. 2). Под микроскопом основная ткань породы сложена сланцеватым, неяснополосчатым, тонкозернистым фибролепидогранобластовым агрегатом,

состоящим из альбита — 60–65 %, хлорит-серицитового агрегата — 20–30 %, актинолита — 10–15 % с незначительным количеством лейкоксена, эпидота и титанита, единичными зернами апатита. На фоне мелкозернистого матрикса встречаются участки слабо разложившейся стекловатой массы породы основного состава с агрегатным мелкозернистым пиритом (рис. 3, а).

Альбит слагает тонкозернистый агрегат с размером зерен 0.01–0.05 мм, на фоне которого выделяются длиннопризматические, лейстовидные (0.1–0.2 мм) и неяснотаблитчатые (0.3–0.7 мм) выделения.

Серицит совместно с хлоритом развит в виде неоднородного по составу агрегата параллельно ориентированных листочков размером до 0.05 мм.

Хлорит образует скопления между лейстами плагиоклаза или замещает роговую обманку, стекло эф-



фузивных и цемент вулканогенно-обломочных пород, а также выполняет прожилки.

Актинолит встречается в виде тонкоигольчатых и игольчато-волокнистых выделений бледно-зеленого цвета, слабая самостоятельные или, вместе с хлоритом и серицитом, линзовидные скопления, или равномерно рассеян в агрегате альбита.

Эпидот и титанит образуют линзы и пятна среди хлорита или хлорит-актинолитового агрегата. Титанит редок, размер до 0.1 мм.

Отмечается присутствие единичных призматических кристаллов апатита размером 0.4–0.6 мм.

Таким образом, основной минеральный состав ортосланцев представлен ассоциацией новообразованных минералов: (эпидот) — актинолит + (хлорит + серицит) + альбит с агрегатным мелкозернистым пиритом.

Вместе с тем на фоне мелкозернистой основной ткани породы наблюдаются участки (гнезда, линзы, полосы), сложенные средне- и крупнозернистым гранобластовым агрегатом кварц-альбит-хлоритового состава с эпидотом и крупными, хорошо ограненными кристаллами пирита (рис. 3, с, d; 4, а, с, d). Кристаллы

пирита имеют размер от 0.1–0.3 мм до 1 см, насыщены микровключениями нерудных минералов (рис. 3, с, d; 4, а, с), их обрастает стебельчатый кварц, крупночешуйчатый хлорит, альбит, эпидот (рис. 3, а, b; 4, с, d).

Появление в тонкозернистой породе участков крупнозернистых гранобластовых агрегатов кварца, хлорита, альбита, эпидота, серицита в ассоциации с крупными кристаллами пирита свидетельствует о дальнейшем развитии метасоматического процесса. Состав метасоматитов: эпидот-альбит-хлорит-кварц + крупные метакристаллы пирита.

Рудным минералом в актинолит-хлорит-серицит-альбитовых ортосланцах минерализованной зоны является пирит. Пирит представлен двумя разновидностями: 1) распыленным в матрике породы мелкозернистым агрегатом Py-I (рис. 3, а, b); 2) мелкими (0.01–0.05 мм) до крупных (0.1–1 мм и выше) кристаллами и их сростками (Py-II), приуроченными к участкам крупнозернистых агрегатов кварц-альбит-эпидот-хлоритового состава (далее — метасоматиты) (рис. 3, с, d). Состав мелкозернистых агрегатов пирита (Py-I), распыленных в основной ткани породы, не определялся. Пирит метасоматитов (Py-II) относится к мышьякови-

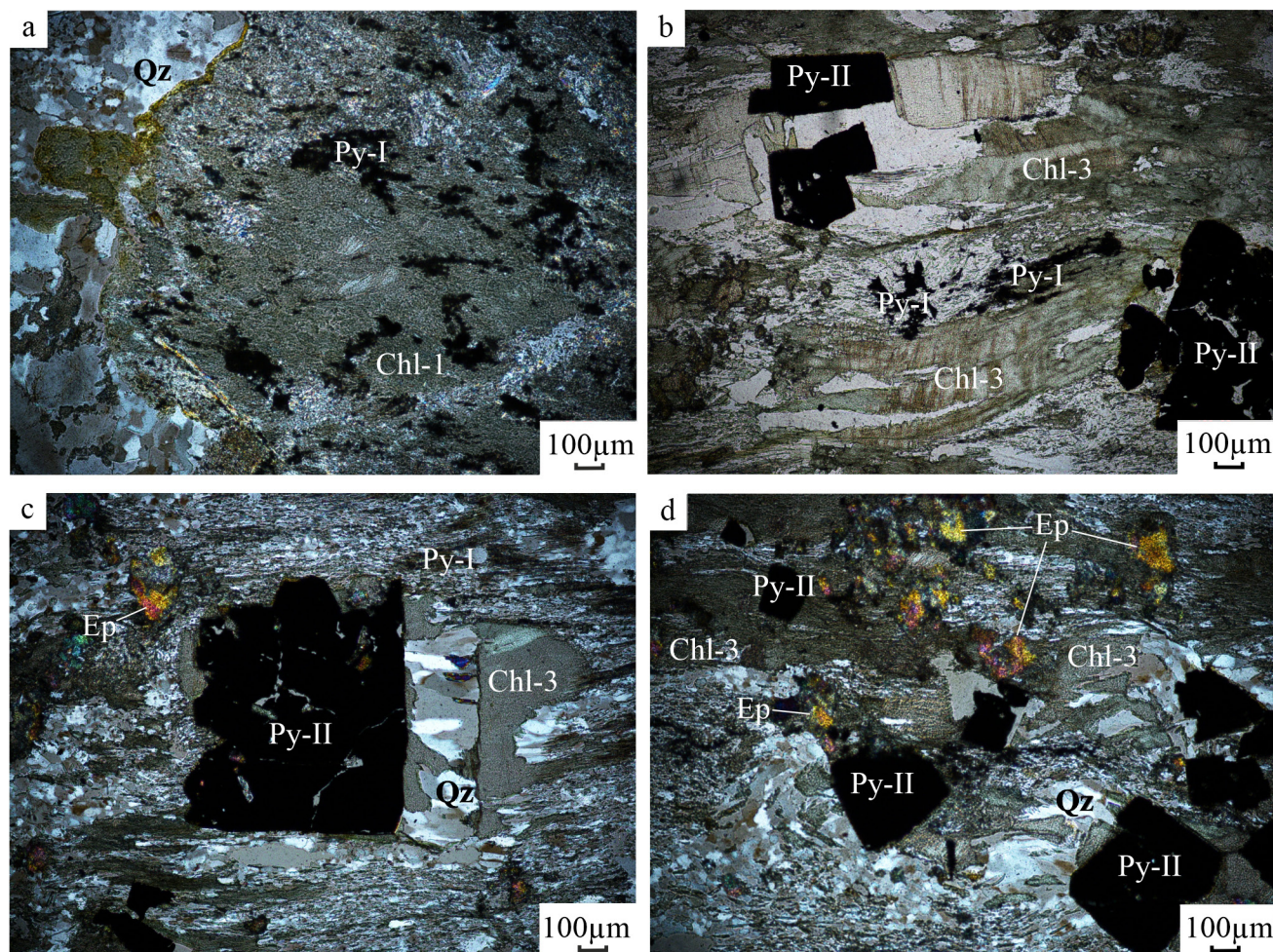


Рис. 3. Актинолит-хлорит-серицит-альбитовый ортосланец с крупнозернистым агрегатом кварц-альбит-хлоритового состава с кристаллами пирита: а — реликт протолита основного состава со скоплениями мелкозернистого пирита; б, с, d — участки крупнозернистого строения с кристаллами пирита (шлиф 16108). а, с, d — фото с анализатором, николи полускрещены; б — режим параллельных николей. Аббревиатуры минералов: Py — пирит, Chl — хлорит, Qz — кварц, Ep — эпидот

Fig. 3. Actinolite-chlorite-sericite-albite orthoschist with a coarse-grained aggregate of quartz-albite-chlorite composition with pyrite crystals: а — relict of protolith of basic composition with accumulations of fine-grained pyrite; б, с, d — areas of coarse-grained structure with pyrite crystals (thin section 16108). а, с, d — photo with analyzer, nicols are half-crossed; б — parallel nicols mode. Mineral abbreviations: Py — pyrite, Chl — chlorite, Qz — quartz, Ep — epidote

стой разновидности — As от 0.15 до 1.28 мас. %, по данным ICP-MS-анализа содержание Au в нем составляет 13.8 г/т, Ag — 2.16 г/т (Ефанова, Ковальчук, Майорова, 2024). В кристаллах пирита обнаружены субмикронные включения золота (размером около 1.5 мкм). Во вмещающих породах, разрушенных до рыхлой глинисто-слюдистой массы, установлены частицы самородного золота рудного облика размером 0.1–0.25 мм (Mayogova et al., 2023).

В минерализованной зоне по пространственному распределению и минеральной ассоциации идентифицированы 3 типа хлорита (Chl-1, Chl-2, Chl-3).

Хлорит (Chl-1) присутствует в основной ткани породы в составе тонкочешуйчатого хлорит-серицитового агрегата (рис. 3, а), встречается в виде микровключений в кристаллах пирита (Chl-2) (рис. 4, а–с) и совместно с кварцем образует более крупночешуйчатые агрегаты вокруг хорошо образованных кристаллов пирита (Chl-3) (рис. 3, с, d; 4, с, d). В последнем случае можно

предполагать, что образование пирита и хлорита происходило одновременно при близкой температуре.

Проведено исследование химического состава включений хлорита (Chl-2) в кристаллах пирита и хлорита (Chl-3), обрамляющего кристаллы пирита в метасоматите (рис. 3, 4, поле шлифа 16108). Состав хлорита основной массы породы (Chl-1) не определялся. Результаты анализа состава хлорита представлены в таблице 2. Полученные данные использованы для расчета температур образования хлорита, ассоциирующего с кристаллами пирита.

В целом химический состав хлорита включений и метасоматитов варьирует в узком диапазоне содержания SiO_2 и Al_2O_3 : от 28.24 до 32.24 мас. % и от 17.77 до 21.45 мас. % соответственно (табл. 2). При этом состав двух включений хлорита в пирите существенно отличается повышенным содержанием SiO_2 (32.13 и 32.24 мас. %) в том же диапазоне содержания Al_2O_3 (17.77 и 20.33 мас. %) (табл. 2, рис. 5). Содержание MgO изме-

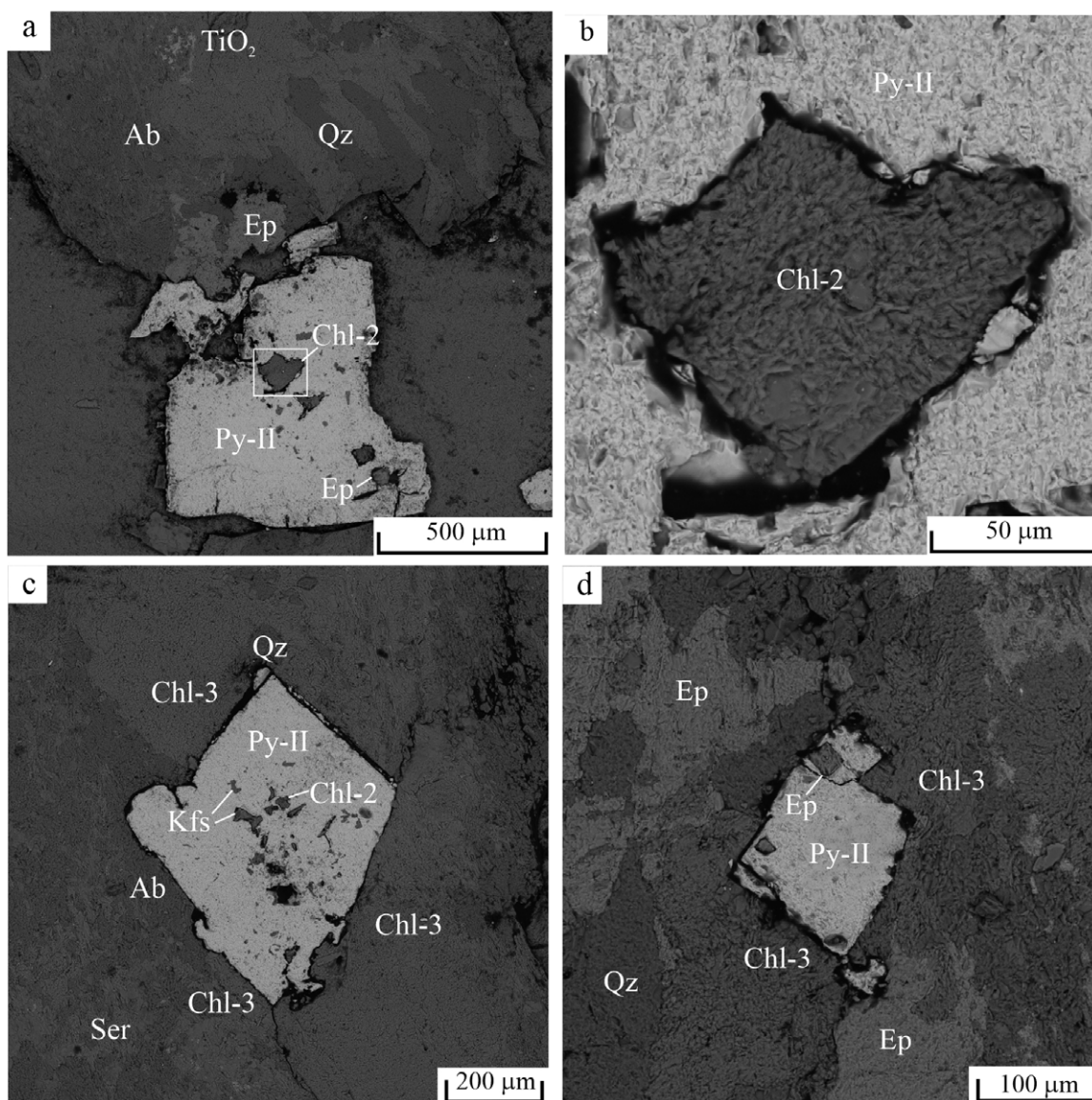


Рис. 4. Кристаллы пирита с микровключениями хлорита (а, b), калиевого полевого шпата (с), эпидота (а, d) в обрамлении крупнозернистого кварц-альбит-эпидот-хлоритового агрегата (шлиф 16108). BSE-изображения. Аббревиатуры минералов: Py — пирит, Chl — хлорит, Qz — кварц, Ep — эпидот, Ab — альбит, Kfs — калиевый полевой шпат, Ser — серицит

Fig. 4. Pyrite crystals with microinclusions of chlorite (a, b), potassium feldspar (c), epidote (a, d) in the frame of a coarse-grained quartz-albite-epidote-chlorite aggregate (section 16108). BSE images. Mineral abbreviations: Py — pyrite, Chl — chlorite, Qz — quartz, Ep — epidote, Ab — albite, Kfs — potassium feldspar, Ser — sericite



Таблица 2. Химический состав включений хлорита в зернах пирита и метасоматитах (мас. %) и рассчитанные температуры его образования

Table 2. Chemical composition of chlorite inclusions from pyrite grains and metasomatites (wt. %) and calculated temperatures of its formation

Включения хлорита в кристаллах пирита / Chlorite inclusions from pyrite crystals										
№ обр. / Sample No.	19 П	22 П	22а Кп	24 П	25 П	16108				
№ ан. / Analyses No.	1	2	3	4	5	1-1 П	2-1 П	4-1 П	5-2 П	5-4 Кп
SiO ₂	29.42	28.70	32.13	28.24	29.63	28.73	30.57	28.65	28.43	32.24
TiO ₂	-	-	-	-	1.41	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	19.47	18.99	17.77	19.21	16.48	21.14	19.43	21.45	20.72	20.33
FeO*	18.85	17.47	15.61	17.63	16.42	17.86	16.76	15.34	15.41	16.03
MnO	0.29	0.29	-	0.32	-	0.14	0.21	0.21	0.22	0.26
MgO	22.00	22.01	19.24	21.44	21.66	21.04	22.4	22.10	21.53	20.08
CaO	-	-	-	-	0.87	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	1.55	-	0.34	-	-	-	-	-
Сумма / Total	90.01	87.45	86.30	86.84	86.81	88.91	89.37	87.75	86.31	88.94

Кристаллохимические коэффициенты в формуле хлоритов (расчет на 10 катионов)
Crystallochemical coefficients in the chlorite formula (calculation for 10 cations)

Si	2.91	2.91	3.32	2.89	3.04	2.88	3.02	2.87	2.90	3.24
Ti	-	-	-	-	0.11	-	-	-	-	-
Al	2.27	2.27	2.16	2.31	1.99	2.49	2.27	2.53	2.49	2.40
Fe''	1.56	1.48	1.35	1.51	1.41	1.49	1.39	1.29	1.32	1.34
Mn	0.02	0.02	-	0.03	-	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	3.24	3.33	2.96	3.27	3.31	3.14	3.30	3.30	3.58	3.00
Ca	-	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-
K	-	-	0.20	-	0.04	-	-	-	-	-
x(Mg)	0.67	0.69	0.69	0.68	0.70	0.68	0.70	0.72	0.71	0.69
Al(IV)	1.09	1.09	0.68	1.11	0.96	1.13	0.98	1.13	1.10	0.77
Al(VI)	1.18	1.18	1.49	1.20	1.03	1.37	1.29	1.40	1.40	1.64
x(Fe)	0.33	0.31	0.31	0.32	0.30	0.32	0.30	0.28	0.29	0.31

Температура кристаллизации / Crystallization temperature

T ₁ , °C	289	290	157	296	247	301	251	302	292	185
T ₂ , °C	284	284	152	291	242	301	251	300	291	185
T ₃ , °C	237	237	162	241	213	243	216	244	238	178

Хлорит в метасоматите / Chlorite from the metasomatite

№ обр. / Sample No.	16108									
№ ан. / Analyses No.	1-2 П	2-4 П	2-5 П	2-6 П	2-8 П	3-1 П	3-2 П	4-4П		
SiO ₂	30.10	29.33	29.13	28.57	30.02	28.61	28.83	29.06		
Al ₂ O ₃	19.78	19.95	20.64	19.88	21.52	20.18	18.97	20.28		
FeO*	19.13	18.70	20.00	20.00	17.19	19.64	19.65	20.41		
MnO	0.30	0.22	0.30	0.32	0.18	0.28	0.23	0.24		
MgO	20.90	20.37	19.63	19.73	22.41	19.57	20.30	19.62		
Cr ₂ O ₃	-	-	0.23	-	-	-	-	-		
Сумма / Total	90.21	88.57	89.93	88.50	91.32	88.28	87.97	89.61		

Кристаллохимические коэффициенты в формуле хлоритов (расчет на 10 катионов)
Crystallochemical coefficients in the chlorite formula (calculation for 10 cations)

Si	3.08	2.94	2.95	2.85	2.97	2.86	2.95	2.93		
Al	2.38	2.36	2.46	2.34	2.51	2.38	2.28	2.36		
Fe''	1.59	1.57	1.67	1.48	1.39	1.50	1.68	1.72		
Mn	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02		
Mg	3.18	3.05	2.97	2.94	3.30	2.92	3.08	2.89		
Cr	-	-	0.02	-	-	-	-	-		
x(Mg)	0.66	0.66	0.64	0.66	0.70	0.66	0.65	0.63		
Al(IV)	0.92	1.06	1.05	1.15	1.03	1.13	1.05	1.07		
Al(VI)	1.46	1.30	1.42	1.20	1.49	1.25	1.22	1.28		
x(Fe)	0.33	0.34	0.36	0.34	0.30	0.34	0.35	0.37		



Окончание таблицы 2 / End of Table 2

Хлорит в метасоматите / Chlorite from the metasomatite									
№ обр. / Sample No	16108								
№ ан. / Analyses No	1-2 П	2-4 П	2-5 П	2-6 П	2-8 П	3-1 П	3-2 П	4-4П	
Температура кристаллизации/ Crystallization temperature									
T ₁ , °C	235	279	276	306	269	278	278	285	
T ₂ , °C	236	280	277	307	268	304	279	286	
T ₃ , °C	206	231	229	247	226	245	230	234	

Примечание. * — все железо приведено в форме FeO, Al(IV) дополняет позицию Si до 8 катионов, а Al(VI) составляет остальную часть общего расчетного количества Al. Разновидности хлорита: П — клинохлор (пикнохлорит), Кп — клинохлор (пеннин). Температуры рассчитаны по хлоритовым геотермометрам (табл. 1). Кристаллохимические формулы разновидностей клинохлора: пикнохлорит (Mg_{2.89–3.33} Fe_{1.48–1.72} Mn_{0.02–0.03} Al_{1.18–1.28})_{5.91–6.01} [Al_{1.05–1.11} Si_{2.95–2.89}]₄ O₁₀ (OH)_{8.09–8.17}; пеннин (Mg_{2.96–3.00} Fe_{1.34–1.35} Mn_{0.00–0.02} Al_{1.49–1.68})_{5.80–6.00} [Al_{0.68–0.77} Si_{3.24–3.32}]₄ O₁₀ (OH)_{8.41–8.91}.

Note: * — all iron is given as FeO, Al(IV) supplements Si position to 8 cations, and Al(VI) accounts for the rest part of the total calculated amount of Al. Chlorite varieties: P — clinochlore (pynochlorite), Kp — clinochlore (pennine). Temperatures are calculated using chlorite geothermometers (Table 1). Crystallochemical formulas of clinochlore varieties: pynochlorite (Mg_{2.89–3.33} Fe_{1.48–1.72} Mn_{0.02–0.03} Al_{1.18–1.28})_{5.91–6.01} [Al_{1.05–1.11} Si_{2.95–2.89}]₄ O₁₀ (OH)_{8.09–8.17}; pennine (Mg_{2.96–3.00} Fe_{1.34–1.35} Mn_{0.00–0.02} Al_{1.49–1.68})_{5.80–6.00} [Al_{0.68–0.77} Si_{3.24–3.32}]₄ O₁₀ (OH)_{8.41–8.91}.

няется от 19.24 до 22.21 мас. % (среднее — 20.90 мас. %), превышая содержание FeO (15.34 — 20.41 мас. %, среднее — 17.89 мас. %). В хлоритах в незначительных количествах присутствуют примеси Mn (0.14–0.32 мас. % или 0.01–0.03 а.ф.е.), редко Ti, Ca, K, Cr, их общее содержание не превышает 0.2–0.3 а.ф.е. (табл. 2). По соотношению Mg и Fe изученный минерал относится к типу Mg-хлорита (Zane, Weiss, 1998) и классифицируется как клинохлор (Wiewiora, Weiss, 1990). По содержанию Si^{IV} (а.ф.е.) обособляются две разновидности клинохлора, которые визуальнo выделяются на диаграмме Si — (Fe/Fe+Mg) (рис. 5) и по номенклатуре (Heu, 1954) попадают в поля пикнохлорита (преобладает) и пеннина. Выделение этих разновидностей клинохлора важно для последующего обсуждения условий их образования, поэтому далее, чтобы подчеркнуть различия их состава, мы будем использовать названия «клинохлор (пикнохлорит)» и «клинохлор (пеннин)».

Клинохлор (пикнохлорит) включений в пирите имеет железистость x(Fe) 0.28–0.33, метасоматитов x(Fe) 0.30–0.37, а клинохлор (пеннин) — x(Fe) 0.31 (табл. 2). Клинохлор (пикнохлорит) включений характеризуется содержанием Si^{IV} 2.87–3.02 (а.ф.е.), коэф-

фициентом магнeзиальности x(Mg) 0.67–0.72, отношением Si^{IV}/Al 0.99–1.53; метасоматитов — содержанием Si^{IV} 2.85–3.08 (а.ф.е.), коэффициентом магнeзиальности x(Mg) 0.63–0.70, отношением Si^{IV}/Al 1.18–1.25, клинохлор (пеннин) — содержанием Si^{IV} 3.24–3.32 (а.ф.е.), коэффициентом магнeзиальности x(Mg) 0.69, отношением Si^{IV}/Al 1.35–1.54. Следует отметить, что клинохлор (пеннин) встречается только в виде микровключений в кристаллах пирита, он не обнаружен в метасоматитах.

Выбор тех или иных хлоритовых геотермометров для оценки температур образования хлорита в значительной степени зависит от состава минерала. Полученные данные по составу клинохлора рудопроявления Ягодное показывают, что он относится к маложелезистой разновидности (x(Fe) < 0.34), поэтому при расчете температур его образования использованы следующие геотермометры (Cathelineau, 1988; Jowett, 1991; Котельников и др., 2012).

Рассчитанные по уравнениям (Cathelineau, 1988; Jowett, 1991) температуры образования хлоритов, ассоциирующих с пиритом, практически не отличаются между собой (табл. 3), колеблются от 242 до 302 °C для

Таблица 3. Сравнение рассчитанных температур образования хлорита по разным термометрам

Table 3. Comparison of calculated temperatures of chlorite formation using different thermometers

Минерал Mineral	T °C	Интервал температур, T °C Temperature range, T °C	Среднее значение, T °C Average value, T °C	Медианное значение, T °C Median value, T °C
Клинохлор (пикнохлорит) — включения в пирите Clinochlore (pynochlorite) — inclusions in pyrite	T ₁ °C	247–302	284	275 ± 28
	T ₂ °C	242–301	282	272 ± 30
	T ₃ °C	213–244	234	228 ± 15
Клинохлор (пикнохлорит) в метасоматите Clinochlore (pynochlorite) in metasomatite	T ₁ °C	235–306	276	270 ± 35
	T ₂ °C	236–307	280	271 ± 35
	T ₃ °C	206–245	231	225 ± 20
Клинохлор (пеннин) — включения в пирите Clinochlore (pennine) — inclusions in pyrite	T ₁ °C	157–185	171	171 ± 14
	T ₂ °C	152–185	168	168 ± 17
	T ₃ °C	162–178	170	170 ± 8

Примечание. Соответствие T₁, T₂, T₃ °C геотермометрам разных авторов см. в таблице 1.

Note: For the correspondence of T₁, T₂, T₃ °C to geothermometers of different authors, see Table 1.



включений клинохлора (пикнохлорита) в пирите и от 235 до 307 °С в метасоматите. Температуры, полученные по уравнению (Котельников и др., 2012) существенно ниже и варьируют от 213 до 244 °С и от 206 до 245 °С для клинохлора (пикнохлорита) включений и метасоматитов соответственно. Хорошая сходимость значений по всем трем геотермометрам наблюдается для температуры образования клинохлора (пеннина) с колебаниями от 152 до 185 °С. С учетом незначительного расхождения расчетных температур (по Cathelineau, 1988; Jowett, 1991) на диаграмме Si — Fe/(Fe+Mg) (рис. 5) показаны температуры кристаллизации хлоритов (по Cathelineau, 1988).

Обсуждение

Согласно предыдущим исследованиям (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001), в центральной части Манитаньрдского района, в Нияюской рудной зоне, все позднерифейско-раннекембрийские породы бедамельской серии и энганепэйской свиты метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации. На золотосульфидно-кварцевых жильных рудопрооявлениях этими авторами установлены околорудные метасоматиты двух формаций: пропилитовой и березит-лиственитовой. Пропилиты имеют региональное

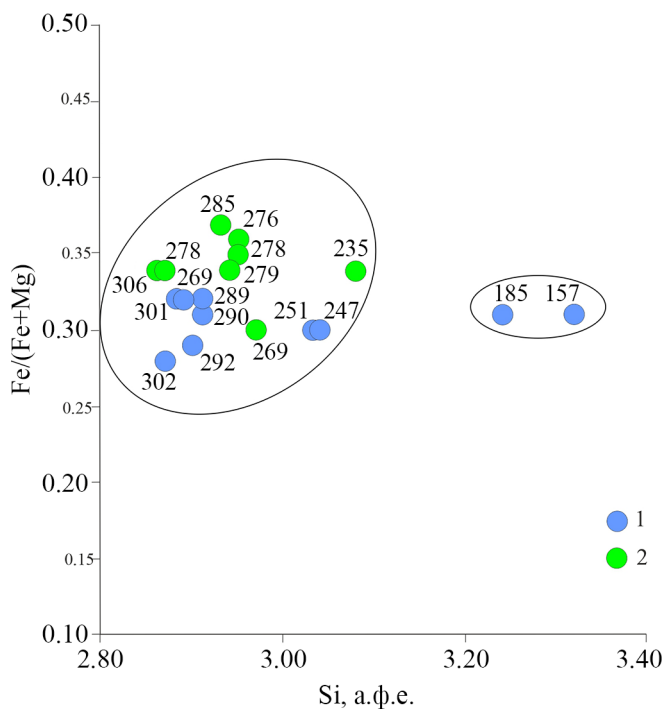


Рис. 5. Составы хлоритов на классификационной диаграмме (Hey, 1954 с изменениями).

Анализы включений клинохлора (пикнохлорит + пеннин) в кристаллах пирита (1), клинохлора (пикнохлорит) в метасоматите (2). Цифрами показаны температуры, рассчитанные с помощью хлоритового геотермометра (Cathelineau, 1988) (табл. 1 и 2)

Fig. 5. Chlorite compositions on the classification diagram (Hey, 1954 with changes).

Analysis of clinocllore (pynochlorite + pennine) inclusions in pyrite crystals (1), clinocllore (pynochlorite) in metasediment (2). Numbers show the formation temperatures calculated with a chlorite geothermometer (Cathelineau, 1988) (Tables 1 and 2)

распространение в рудной зоне и характеризуются несколькими парагенезисами: эпидот + актинолит + кварц, эпидот + хлорит + кварц, эпидот + кварц. Поздние метасоматиты имеют непостоянный состав — от кварц-серицит + кальцит (кварц-серицитовые) до кварц-серицит + доломит-анкерит (березиты), которые наиболее четко проявлены на месторождении Верхне-нияюское-2. На рудопрооявлениях Нияюское-1 и -2 (рис. 1) рудная минерализация жильного и штокверкового типа также сопровождается метасоматитами двух указанных формаций, причем с пропилитами связаны золотоносные пиритовые руды вкрапленного типа (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001).

Во вмещающих породах основного состава золотоносного интервала рудопрооявления Ягодное нами установлена следующая новообразованная ассоциация минералов — (эпидот) актинолит + (хлорит + серицит) + альбит с агрегатным мелкозернистым пиритом, с сохранением на некоторых участках реликтов протолита в виде обособлений слабо разложившейся стекловатой массы породы основного состава (рис. 3, а). С одной стороны, такая ассоциация характерна для метаморфических пород фации зеленых сланцев, с другой стороны, аналогичная минеральная ассоциация является типоморфной для эпидот-хлоритовой фации пропилитов, где один из основных минералов парагенезисов в метасоматической колонке представлен хлоритом (пикнохлоритом) (Арутюнян, 2008; Знаменский, 2023; Шафигуллина, Знаменский, Косарев, 2020). Часто различить зеленосланцевые метаморфиты и пропилиты бывает затруднительно, но их принципиальным отличием является присутствие в последних рудной минерализации (Жданов, 2005; Петрографический кодекс, 2008). В плане идентификации характера изменений пород в золотоносном интервале рудопрооявления Ягодное формирование в тонкозернистой породе крупнозернистых гранобластовых сегрегаций кварца, хлорита, альбита, эпидота, серицита вокруг крупных кристаллов пирита свидетельствует о проявлении метасоматического процесса. Состав метасоматитов — эпидот-альбит-кварц-хлоритовый+пирит (или эпидот-альбит-хлорит-кварцевый + пирит). Таким образом, мы относим новообразованную ассоциацию минерализованных пород к эпидот-хлоритовой субфации пропилитовой фации метасоматитов, тем более что они локализируются в пределах Нияюской рудной зоны и содержат рудную минерализацию в виде золотоносного пирита (Жданов, 2005; Петрографический кодекс, 2008).

Практически идентичный химический состав клинохлора (пикнохлорита) включений в кристаллах пирита (Chl-2) и в его обрамлении в метасоматите (Chl-3) позволяет предположить их одновременное образование, сопряженное с ростом метакристаллов пирита, в едином метасоматическом процессе.

Рассчитанные температуры образования клинохлора (пикнохлорита) включений в пирите и в метасоматитах составляют 302–247 °С и 306–235 °С соответственно, т. е. практически не различаются. Температуру образования единичных включений клинохлора (пеннина) в кристаллах пирита 185–157 °С, по-видимому, можно рассматривать как нижний предел метасоматического процесса. Общий температурный интервал образования хлоритов составляет в 306–157 °С с пиком температуры 306–235 °С.



Выводы

1. Вмещающие породы золотоносного интервала минерализованной зоны рудопоявления Ягодное представлены пропилитами — метасоматитами эпидот + актинолит + альбит + хлоритового состава с присутствием участков средне-крупнозернистого гранобластового агрегата альбит-кварц-хлоритового состава с эпидотом и крупными, хорошо ограниченными метакристаллами пирита.

2. По пространственному распределению и минеральной ассоциации выделены три разновидности хлорита (Chl): в составе тонкозернистого хлорит-серицитового агрегата в основной ткани породы (Chl-1); в виде микровключений в метакристаллах пирита (Chl-2); ассоциирующий с метакристаллами пирита в гранобластовых агрегатах метасоматитов (Chl-3).

3. Chl-2 и Chl-3 по химическому составу отвечают клинохлору (пикнохлориту), который присутствует как в виде включений в кристаллах пирита, так и в метасоматитах. Они практически не различаются между собой, что свидетельствует об одновременном образовании. Единичные микровключения Chl-2 в метакристаллах пирита отвечают клинохлору (пеннину).

4. Рассчитанные температуры формирования клинохлора Chl-2 и Chl-3, ассоциирующего с метакристаллами пирита, ложатся практически в один и тот же интервал 302–247 °C и 306–235 °C соответственно. Для клинохлора (пеннина) этот интервал ниже и составляет 185–157 °C.

5. Тесная ассоциация хлорита и метакристаллов золотоносного пирита в гранобластовых агрегатах свидетельствует об их одновременном образовании в течение единого метасоматического процесса в температурном интервале 306–157 °C с пиком температуры 306–235 °C.

Авторы выражают искреннюю признательность анонимным рецензентам за внимательное рассмотрение представленной статьи, ценные замечания, исправление которых, несомненно, улучшило её качество, и рекомендации, которые будут учтены в дальнейших исследованиях и публикациях.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 1220406000009-2.

Литература / References

Арутюнян М. А. Характер проявления прерудной пропилитизации в диорит-порфиритах Каджаранского рудного поля // Известия НАН РА. Науки о Земле. 2008. Т. 61. № 2. С. 29–34.
Harutyunian M. A. The character of preore propylitization occurrence in diorite-porphyrates or the Kajaran ore field. News of the NAS RA. Earth Sciences. 2008, V. 61, No. 2, pp. 29–34. (in Russian)
Вахрушев С. Н., Макаров А. Б. Минералого-геохимические особенности руд и метасоматитов золотомышьяковых проявлений одного из районов // Геохимия и минералогия первичных и вторичных ореолов. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1986. С. 84–93.
Vakhrushev S. N., Makarov A. B. Mineralogical and geochemical features of ores and metasomatites of gold-arsenic manifestations of one of the regions. Geochemistry and mineralogy of primary and secondary halos.

Sverdlovsk, Publishing house of the Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, 1986, pp. 84–93. (in Russian)

Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-V, VI (Воркута). Объяснительная записка / М. А. Шишкин, О. Н. Малых, П. Е. Попов, Л. С. Колесник. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 262 с.

State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Second edition. In Ser. Polar-Urals. Sheet Q-41-V, VI (Vorkuta). Explanatory Note Kart / M. A. Shishkin, O. N. Malykh, P. E. Popov, L. S. Kolesnik. MF VSEGEI: Moscow, 2013, 262 p.

Ефанова Л. И. Нияуская рудная зона. Кряж Манитаньрд // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2020): Материалы российской конференции с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2020. С. 192–194.

Efanova L. I. Niyauskaya ore zone. Manitanyrd ridge Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin readings — 2020): Proceedings of the Russian conference with international participation. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS. 2020, pp. 192–194. (in Russian)

Ефанова Л. И., Ковальчук Н. С., Майорова Т. П. Микропримеси в пирите золоторудных проявлений хребта Манитаньрд (Полярный Урал) // Руды и металлы. 2024. № 2. С. 36–62. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10017

Efanova L. I., Kovalchuk N. S., Mayorova T. P. Microimpurities in pyrite of gold-ore occurrences of the Manitanyrd ridge (the Polar Urals) Ores and metals, 2024, No. 2, pp. 36–62. (in Russian)

Ефанова Л. И., Кузнецов С. К., Тарбаев М. Б., Майорова Т. П. Золотоносность Манитаньрдского района и перспективы наращивания ресурсного потенциала (Полярный Урал) // Руды и металлы. 2020. № 3. С. 39–51. DOI: 10.24411/0869-5997-2020-100

Efanova L. I., Kuznetsov S. K., Tarbaev M. B., Mayorova T. P. Gold content of the Manitanyrdsky area and prospects for resource potential ramp-up (Polar Urals). Ores and Metals, 2020, No. 3, pp. 39–51. (in Russian)

Жданов В. В. К проблеме классификации метаморфических и метасоматических пород // Зап. ВМО. 2005. Ч. CXXXIV. № 3. С. 131–140.

Zhdanov V. V. Problem of classification of metamorphic and metasomatic rocks. Zapiski RMO, 2005, CXXXIV, No. 4, pp. 58–71. (in Russian)

Знаменский С. Е. Минералогия и P-T-условия образования метасоматических пород Вознесенского месторождения золота (Южный Урал) // Литосфера. 2023. 23(3). С. 430–446. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-430-446>

Znamensky S. E. Mineralogy and P-T conditions for the formation of metasomatic rocks of the Voznesenskoye gold deposit (Southern Urals) Lithosphere (Russia), 2023/ 23(3), pp. 430–446. (in Russian)

Котельников А. Р., Сук Н. И., Котельникова З. А., Щекина Т. И., Калинин Г. М. Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. NZ9001. doi:10.2205/2012NZ_ASEMPG.

Kotelnikov A. R., Suk N. I., Kotelnikova Z. A., Shchekina T. I., Kalinin G. M. Mineral geothermometers for low-temper-



- ature parageneses. Bulletin of the Earth Sciences Department of the Russian Academy of Sciences, 2012, V. 4, (in Russian)
- Кузнецов С. К., Майорова Т. П., Сокерина Н. В., Филиппов В. Н. Золоторудная минерализация Верхнеурайского месторождения на Полярном Урале // Записки РМО. 2011. Ч. CXXXX. № 4. С. 58–71.
- Kuznetsov S. K., Mayorova T. P., Sokerina N. V., Filippov V. N. Gold-ore mineralization of the Verkhneuyayus deposit, the Polar Urals. Zapiski RMO, 2011, CXXXX, No. 4, pp. 58–71. (in Russian)
- Майорова Т. П., Ефанова Л. И. Проявление золотомышьяковистого типа Нияхойское-2 на Полярном Урале (кряж Манитанырд) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 8. С. 33–41. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-8-33-41
- Mayorova T. P., Efanova L. I. Occurrence of the gold-arsenic type Niyakhoy-2 in the Polar Urals (Manitanyrd ridge) Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2019, No. 8, pp. 33–41. (in Russian)
- Майорова Т. П., Ефанова Л. И., Сокерина Н. В. Минералогическо-геохимические особенности руд золото-кварц-сульфидного проявления Верхнелекеецкое на Полярном Урале (кряж Манитанырд) // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 10–25. DOI: 10.19110/geov.2022.6.2
- Mayorova T. P., Efanova L. I., Sokerina N. V. Mineralogical and geochemical features of the ores of the Verkhnelekeetskoye gold-quartz-sulfide occurrence in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge). Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 10–25. (in Russian)
- Петрографический кодекс (магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования) / Под ред. О. А. Богатикова, О. В. Петрова. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. 204 с.
- Petrographic code of Russia (magmatic, metamorphic, metasomatic, impact rock-assemblages). Editors-in-chief O. A. Bogatikov, O. V. Petrov. St. Petersburg VSEGEI Press, 2008, 204 p. (in Russian)
- Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. Екатеринбург: Изд-во УГТГА, 2001. 622 с.
- Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu. A. Gold deposits of the Urals. Yekaterinburg: Publishing house of the Ural State Mining and Geotechnical Academy, 2001. 622 p. (in Russian)
- Шафигуллина Г. Т., Знаменский С. Е., Косарев А. М. Условия образования золотопорфирового оруденения месторождения Большой Каран (Южный Урал) по данным хлоритовой геотермометрии // Геологический вестник. 2020. № 2. С. 45–53. <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-2-4>
- Shafigullina G. T., Znamensky S. E., Kosarev A. M. Conditions for the formation of gold-porphyry mineralization of the Bolshoy Karan deposit (Southern Urals) according to chlorite geothermometry. Geologicheskii vestnik, 2020, No. 2, pp. 45–53. (in Russian)
- Bailey S. W. Summary of recommendations of AIPEA Nomenclature Committee // Clays and Clay Minerals, 1980. V.15. P. 85–93. DOI: <https://doi.org/10.1180/claymin.1980.015.1.07>
- Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature // Clay Miner. 1988, V. 23, P. 471–485. doi: 10.1180/claymin.1988.023.4.13
- Cathelineau M., Neiva D. A chlorite solid solution geothermometer the Los Asufres (Mexico) geothermal system // Contrib. Mineral. Petrol., 1985. V.91. P. 235–244.
- Hey M.H. A new review of chlorites // Miner. Mag. 1954. V. 30. N 224. P. 277–292. doi:10.1180/minmag.1954.030.224.01
- Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas) / S.W. Bailey et al.; ed. by S.W. Bailey. Review of Mineralogy, 1991. V. 19. P. 719.
- Inoue A., Kurokawa K., Hatta T. Application of Chlorite Geothermometry to Hydrothermal Alteration in Toyoha Geothermal System, Southwestern Hokkaido, Japan // Resource Geology, 2010. V. 60, No. 1: 52–70. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00114.x>
- Jowett E. C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer // GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting, Toronto, May 27–29, 1991, Program with Abstracts 16. A 62. 1991.
- Kranidiotis P., MacLean W.H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec // Economic Geology. 1987. V. 82. P. 1898–1911. DOI: 10.2113/GSECONGEO.82.7.1898
- Martinez-Serrano R.G., Dubois M. Chemical variations in chlorite at the Los Humeros geothermal system, Mexico // Clays and Clay Minerals, 1998. V. 46. No. 6. P. 615–628
- Mayorova T. P., Kuznetsov S. K., Efanova L. I., Sokerina N. V. Gold–Sulfide Mineralization in the Manitanyrd Region, Polar Urals, Russia // Minerals, 2023, 13(6), 747. <https://doi.org/10.3390/min13060747>
- Wang Y., Fan H., Pang Y., Xiao W. Geochemical Characteristics of Chlorite in Xiangshan Uranium Ore Field, South China and Its Exploration Implication // Minerals 2022, 12, 693. <https://doi.org/10.3390/min12060693>
- Wiewiora A., Weiss Z. Crystallochemical Classifications of Phyllosilicates Based on the Unified System of Projection of Chemical Composition; II, The Chlorite Group // Clay Miner. 1990, 25. P. 83–92. doi:10.1180/claymin.1990.025.1.09
- Zane A., Weiss Z. A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data // Rend. Fis. Acc. Lincei, 1998. V. 9. P. 51–56.
- Zang W., Fyfe W. S. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil // Mineralium Deposita. 1995. V. 30. No. 1. V. 30–38.

Поступила в редакцию / Received 23.04.2025



Кремний в железомарганцевых образованиях Японского моря: особенности выделения и взаимоотношение с главными рудными фазами

Н. В. Астахова

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

n_astakhova@poi.dvo.ru

В статье рассматриваются особенности распространения кремниевой минерализации в железомарганцевых корках Японского моря. Формирование корок приурочено к привершинным частям подводных вулканов. На некоторых из них среди материала драгирования обнаружены марганцевые и железокремнистые корки с примесью марганца. Главными породообразующими элементами в составе корок являются Mn (0.2–63.1 %), Fe (0.01–42.5 %) и Si (0.4–37.9 %). Значение Fe/Si изменяется от 0.01 до 5.5, Mn/Si – от 0.01 до 177.5. Содержание кремния существенно различается не только в образцах, отобранных на разных возвышенностях, но и в образцах, поднятых на одной и той же станции. Кроме железокремнистых корок, образованных зернами предположительно глауконита (селадонита), сцементированного кварцем, высокое содержание кремния имеют корки, где этот же глауконит сцементирован гидроксидами марганца. Повышенное содержание Si имеют образцы, в которых наряду с марганцевой матрицей встречаются участки аморфного кремнезема или происходит пропитка осадка гидроксидами марганца. Общая схема рудоотложения на подводных вулканах Японского моря следующая: Fe-Si → Si → Mn → Ba. В некоторых случаях наблюдается искажение этой закономерности, что связано, скорее всего, с пульсирующим поступлением гидротермального раствора из-за повторной вулканической деятельности.

Ключевые слова: железомарганцевые корки, кремний, Fe-слюды, Японское море

Silicon in ferromanganese crusts from the Sea of Japan: peculiarities of allocation and interrelation with main ore phases

N. V. Astakhova

V. I. Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch RAS, Vladivostok, Russia

The article considers the distribution features of siliceous mineralization in ferromanganese crusts of the Sea of Japan. The crusts are formed near the top parts of submarine volcanos. Both manganese crusts and ferrosiliceous crusts with manganese admixture were found on some of them, among the dredging material. The main rock-forming elements in the crusts are Mn (0.2–63.1 %), Fe (0.01–42.5 %) and Si (0.4–37.9 %). The Fe/Si value varies from 0.01 to 5.5, Mn/Si – from 0.01 to 177.5. The silicon content varies significantly not only in samples collected at different rises, but also in samples raised at the same station. In addition to ferrosiliceous crusts, formed as a result of quartz cementation of grains of presumably glauconite (celadonite), crusts where the same glauconite is cemented by manganese hydroxides have a high silicon content. The samples with amorphous silica areas along with the manganese matrix, or where the sediment is impregnated with manganese hydroxides, have an increased Si content. The general pattern of ore deposition on underwater volcanoes in the Sea of Japan is as follows: Fe-Si → Si → Mn → Ba. This pattern is distorted in some cases, which is most likely conditioned by the pulsating flow of hydrothermal fluids during subsequent volcanic activity.

Keywords: ferromanganese crusts, silicon, Fe-slides, Sea of Japan

Введение

Японское море входит в систему окраинных морей северо-западной части Тихого океана и располагается в зоне перехода океанической коры Тихого океана к континентальной коре Азиатского континента. Это море представляет собой рифтогенную систему, образовавшуюся вследствие растяжения, вызванного перемещением Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит и внедрением мантийного плюма. Наиболее активное рифтообразование происходило в кайнозойское время и привело к формированию глубоководных котловин (Леликов и др., 2006).

Особый интерес представляют вулканические возвышенности, расположенные в глубоководных котловинах Японского моря. Высота этих возвышенностей

порядка 2 км, а минимальные глубины от вершин до поверхности моря превышают 1 км. Образование их произошло в основном в среднемиоцен-плиоценовое время (Берсенева и др., 1987; Леликов и др., 2001). Все возвышенности сложены различными по уровню кремнезема (от базальтов до трахириолитов) вулканическими породами, которые являются производными одной базальтовой магмы. Плагинкловитовые базальты резко преобладают среди вулканитов и составляют 80–90 % объема поднятого материала. Содержание SiO₂ в них составляет 46–49 % (Съедин, 1987). Образцы базальтов часто представляют собой фрагменты шаровой отдельности секториальной (клиновидной) формы со стекловатой коркой закалывания, что указывает на подводные условия формирования (Берсенева и

Для цитирования: Астахова Н. В. Кремний в железомарганцевых образованиях Японского моря: особенности выделения и взаимоотношение с главными рудными фазами // Вестник геонаук. 2025. 6(366). С. 14–23. DOI: 10.19110/geov.2025.6.2

For citation: Astakhova N. V. Silicon in ferromanganese crusts from the Sea of Japan: peculiarities of allocation and interrelation with main ore phases. Vestnik of Geosciences, 2025, 6(366), pp. 14–23, doi: 10.19110/geov.2025.6.2



др., 1987). Характерной особенностью пород является их высокая (до 40 %) пористость (Свининников, Съедин, 1984). При драгировании привершинных частей большинства этих структур совместно с вулканитами часто поднимали железомарганцевые корки (ЖМК) (Астахова, Введенская, 2003). Проведенные исследования показали, что в формировании ЖМК Японского моря участвуют две основные рудные фазы: марганцевая и железокремнистая. Железомарганцевая встречается редко и в некоторых случаях может формироваться в результате «пропитки» гидроксидами марганца глинистых минералов (Астахова, 2018). Марганцевая минерализация в Японском море довольно хорошо изучена, в отличие от железокремнистой. Поэтому в данной работе будут рассмотрены особенности выделения кремния, повышенные содержания которого выявлены в железомарганцевых корках на 9 возвышенностях Японского моря (рис. 1), и его взаимоотношение с основными рудными фазами.

Материалы и методы исследований

Материалом для исследования послужили образцы железомарганцевых корок, отобранные в морских экспедициях ТОИ ДВО РАН с 1976 по 2015 год. Все об-

разцы изучались при помощи стереоскопического микроскопа Stemi 2000-C (Zeiss, Германия). Для определения содержания макро-(Fe, Mn, Si, Al, Ca, Mg, Ti) и микроэлементов в ЖМК использовался атомно-эмиссионный (с индуктивно связанной плазмой) метод анализа на спектрометре Agilent 7500c (Agilent Technologies, США) в центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН. Определение содержания п.п.п. и Si выполнено методом гравиметрии. Все определения элементов выполнялись на навеску, высушенную при 105 °С. Для более детального изучения были изготовлены аншлифы рудных корок, которые изучались в этом же центре при помощи микронзондового анализатора JXA-8100 (JEOL Ltd., Япония) с тремя волновыми спектрометрами, доукомплектованного энергодисперсионным спектрометром INCAx — sight (Oxford Instruments Analytical Ltd., Англия). Анализ осуществлялся при ускоряющем напряжении 20 кВ, угол отбора излучения составлял 45°. В ходе анализа использовалась библиотека эталонов пользователя. Количественный и полуколичественный анализ производился по процедуре PhyRoZ, являющейся стандартной программой энергодисперсионного анализатора Link ISIS. Для исследования образец напылялся тонким слоем углерода. Объем области, в которой производилось опреде-

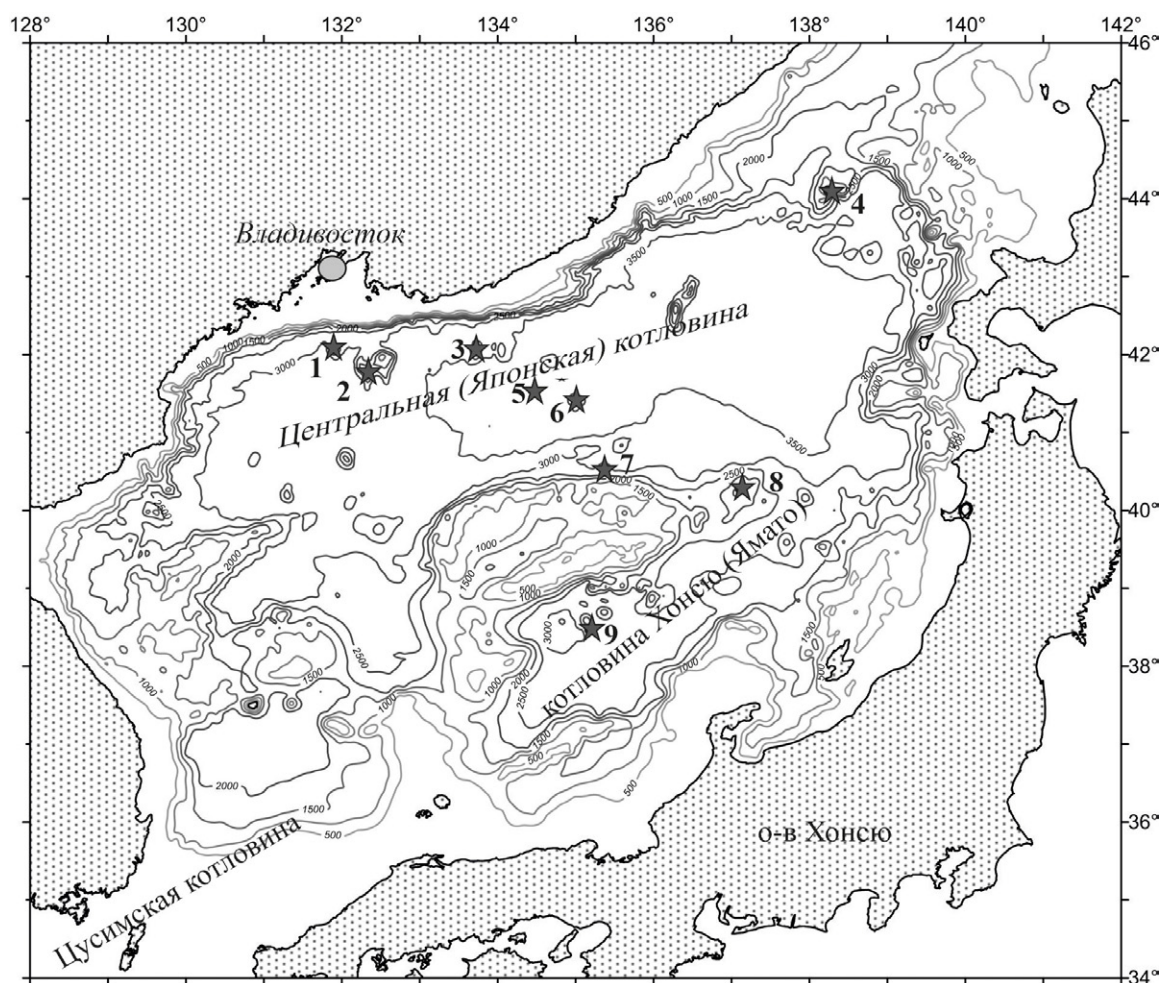


Рис. 1. Карта-схема фактического материала. Значками показано местоположение подводных возвышенностей с железокремнисто-марганцевой минерализацией: 1 — гора Петра Великого, 2 — Первенец, 3 — хребет Васильковского, 4 — Витязя, 5 — безымянная, 6 — Беляевского, 7 — Шевалдина, 8 — наложенная постройка на возв. Южное Ямато, 9 — Медведева

Fig. 1. Sketch map of the factual material. Location of seamounts with the ferro-siliceous-manganese mineralization: 1 — Peter the Great; 2 — Pervenets; 3 — Vasil'kovsky Ridge; 4 — Vityaz; 5 — unnamed; 6 — Belyaevsky; 7 — Shevaldin; 8 — superimposed edifice on South Yamato Rise; 9 — Medvedev



ление химического состава, принимался объем с максимальным размером 3–4 микрона. Рентгеновский спектр этой области анализировался ЭДС и отображался на экране компьютера, который с помощью программного обеспечения производил анализ данного спектра и указывал положения линий тех элементов, которые были программно обнаружены.

Результаты исследования и их обсуждение

Железомарганцевые отложения Японского моря представлены в основном корками толщиной от нескольких миллиметров до 25 см, реже — конгломератами. Корки подразделяются на однослойные марганцевые и двуслойные марганцевые и железо-марганцевые. В марганцевых двуслойных корках различаются монолитные и рыхлые слои, иногда — монолитные и почковидные слои, последние образованы сросшимися оолитами. В классических железомарганцевых корках выделяются нижний ожелезненный и верхний марганцевый слои, граница между ними, как правило, нечеткая, размытая. Количество железомарганцевых корок, по сравнению с марганцевыми, незначительное.

Основными рудообразующими минералами марганца в ЖМК являются тодорокит и бернессит, редко пиролюзит (Можеровский и др., 1989; Астахова и др., 2015).

Образование железомарганцевых корок на дне Японского моря связано с гидротермально-осадочными процессами. Об этом свидетельствуют: приуроченность корок к привершинным частям подводных вулканических построек, особенности химического состава корок и заполнение гидроксидами марганца пор в подстилающих базальтах (Скорнякова и др., 1987; Астахова, Введенская, 2003; Астахова и др., 2014; Батурин, 2012; Михайлик и др., 2014 и др.).

Химический состав железомарганцевых корок

Главными породообразующими химическими элементами в составе ЖМК Японского моря являются Mn, Fe и Si (табл. 1). Содержание этих элементов варьирует в широких пределах: Mn — от 0.2 до 63.1 % (среднее — 34.1 %); Fe — от 0.01 до 42.5 % (среднее — 6.6 %); Si — от 0.4 до 37.9 % (среднее — 10.2 %). Соответственно значение Mn/Fe изменяется от 0.01 до 9016 и в среднем составляет 463.5; Fe/Si — от 0.01 до 5.5 (среднее — 0.7); Mn/Si — от 0.01 до 177.5 (среднее — 24.0) (табл. 1). Значения этого отношения существенно различаются не только в образцах, отобранных на разных участках развития железомарганцевой минерализации, но и в образцах, поднятых на одной и той же станции. Часто это связано с примесью терригенного (эдафогенного) осадка.

Все остальные макроэлементы присутствуют в ЖМК в подчиненных количествах. Так, содержания Al, Ca, Mg, K, Na не превышают первых процентов, а Ti и P — десятых долей процента (табл. 1).

Концентрации микроэлементов в составе ЖМК незначительны — десятые или сотые доли процента (табл. 2). Исключением является барий, содержание которого может достигать 3 %. Суммарная концентрация Ni, Co, Cu варьируется от 71 до 3323 ppm, состав-

Таблица 1. Средний химический состав (вес. %) и соотношение элементов в ЖМК Японского моря

Table 1. Average chemical composition (wt. %) and the ratio of elements in FMCs from the Sea of Japan

Элементы, соотношения Elements, ratios	n	Средн. Aver.	Мин. Min	Макс. Max
Fe	51	6.6	0.01	42.5
Mn	51	34.1	0.18	63.1
Si	51	10.2	0.36	37.9
Al	51	1.1	0.01	7.6
Ca	51	0.8	0.07	3.5
Ti	51	0.1	0.00	0.9
Mg	51	1.4	0.07	2.9
K	44	1.3	0.07	4.9
P	44	0.1	0.00	0.3
Na	41	1.1	0.00	3.8
п.п.п.	31	12.5	3.82	18.1
Mn/Fe	51	464	0.01	9016
Fe/Si	51	1	0.01	6
Mn/Si	51	24	0.01	178
(Mn+Fe)/Ti	51	3693	14	22479
Ni+Co+Cu	51	980	71	3323

Примечание: n — количество проб

Note: n — number of samples

Таблица 2. Содержание микроэлементов (10^{-4} %) в ЖМК Японского моря

Table 2. Microelement content (in ppm) in FMCs from the Sea of Japan

Элементы, Elements	n	Сред. Aver.	Мин. Min	Макс. Max
Ba	51	5034	0	29667
Co	51	264	2	2033
Cr	51	18	2	192
Cu	51	165	2	652
La	38	17	1	86
Ni	51	550	41	2432
Pb	51	58	1	508
Sr	51	945	22	2655
V	51	280	6	1245
Zn	51	237	10	610
Zr	38	45	1	312
Mo	44	218	3	640
Li	43	384	4	5070
Be	31	2	0,1	41
As	31	54	6	251
Rb	31	37	0,4	156
Nb	31	2	0,1	7
Cd	31	3	0,1	16
Cs	31	2	0,1	7
W	31	91	2	427

Примечание: n — количество проб

Note: n — number of samples



ляя в среднем 979.5 ppm. Основной вклад принадлежит Ni и Co, наиболее высокие концентрации этих элементов — 0.24 и 0.20 %, соответственно. Распределение Ni, Co и Si неравномерное как в образцах, отобранных на разных возвышенностях, так и в образцах одной и той же станции. Например, в образцах ЖМК, поднятых на возвышенности Первенец, содержание Ni меняется от 649 до 2432 ppm (Астахова и др., 2019), а в корках возвышенности Витязя Co составляет от 74 до 2033 ppm. Относительно высокие концентрации определены для стронция и ванадия, для всех остальных микроэлементов — до нескольких сотен ppm (табл. 2).

Формы выделения кремния в железомарганцевых корках

Детальное изучение образцов под стереоскопическим и электронным микроскопами с микрозондовой приставкой показало несколько разновидностей соединений кремния в ЖМК Японского моря. Наиболее широко распространены и дают более высокое содержание Si включения зеленых или бурых зерен железокремнистого состава (предположительно глауконита) в составе рудных корок (рис. 2, 3), реже участки с кремнистым цементом или пропитка терригенного (эда-

фогенного) осадка гидроксидами марганца. Следует отметить, что на одних и тех же возвышенностях часто встречаются корки как с высоким, так и с низким содержанием Si. Это можно объяснить длительностью интервала драгирования в сотни метров вверх по склону и длиной возвышенностей в десятки километров. При детальном опробовании некоторых из них (например, на возвышенности Беляевского длиной 35 км) выявлено 3 района марганцевого рудообразования в южной, центральной и северной частях восточного склона этой постройки (Скорнякова и др., 1987; Астахова и др., 2010; Колесник, Ярошук, 2019).

Корки, содержащие включения зерен железокремнистого состава, были обнаружены на горе Петра Великого, возвышенностях Первенец, Васильковского, Шевалдина, Южное Ямато, Беляевского, Медведева. На первых пяти возвышенностях корки содержат значительное количество этих зерен (рис. 2). На северном окончании возвышенности Беляевского среди рудных корок также была обнаружена кремнисто-глауконитовая глыба с содержанием Mn 33 % (Скорнякова и др., 1987; Батурин, 2012). В ЖМК на других участках этой возвышенности, а также на возвышенности Южное Ямато и южном склоне возвышенности Медведева (ст. 1344) были определены лишь единич-

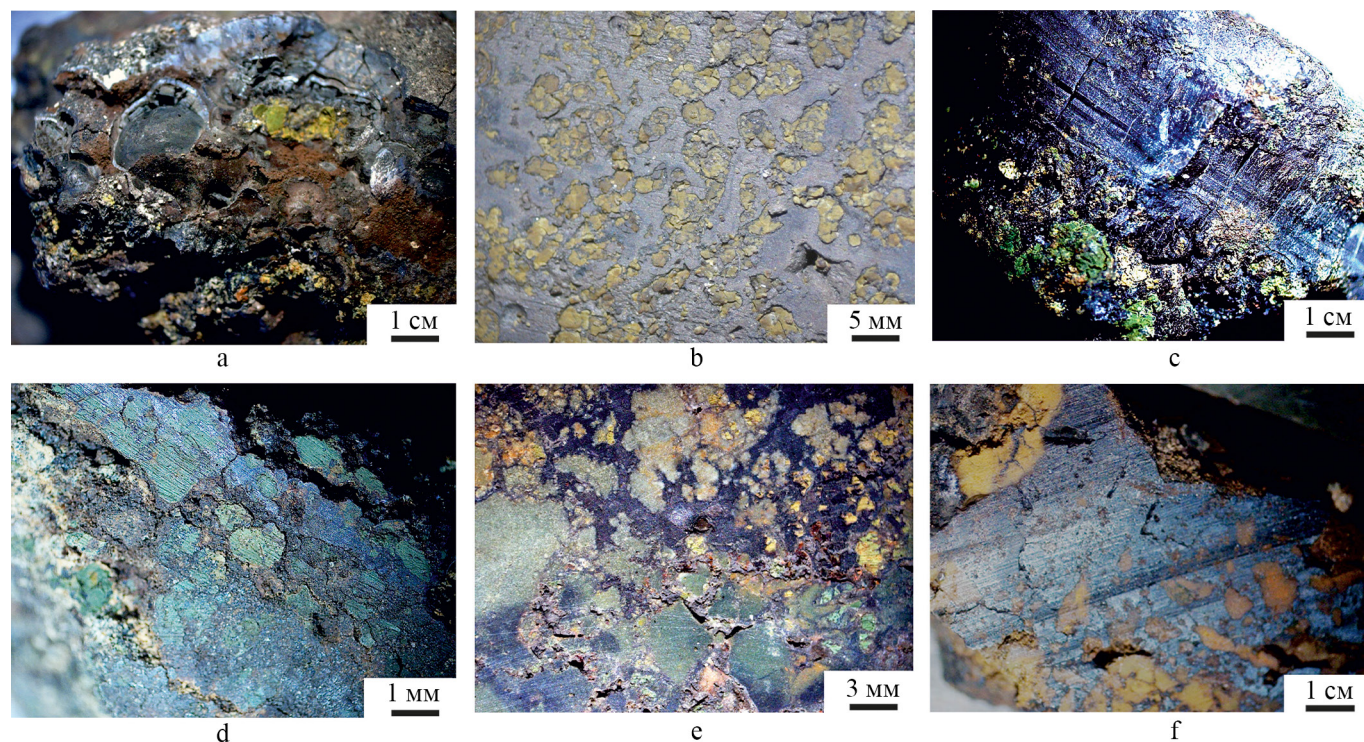


Рис. 2. Железосилико-марганцевые корки Японского моря:

a–b — возвышенности Первенец: a — граница между верхней почковидной и нижней частями корки, b — цементация зерен Fe-Si-состава гидроксидами марганца в нижней части корки; c–d — горы Петра Великого: c — граница между верхней марганцевой и нижней частями корки, d — цементация зерен Fe-Si-состава гидроксидами марганца в нижней части корки; e — коррозионный марганцевый цемент в глауконит (?)–кремнистых обломках железомарганцевых корок (возвышенность Васильковского); f — возвышенности Шевалдина: цементация бесформенных обломков Fe-Si-состава гидроксидами марганца

Fig. 2. The ferrosiliceous-manganese crusts of the Sea of Japan:

a–b — the Pervenets seamounts: a — boundary between the upper kidney-shaped part and the lower part of the crust, b — cementation of Fe-Si grains with manganese hydroxides in the lower part of the crust; c–d — the Peter the Great Mts.: c — boundary between the upper manganese and the lower part of the crust, d — cementation of Fe-Si grains with manganese hydroxides in the lower part of the crust; e — the Vasilkovsky Seamount: corrosive manganese cement in glauconite(?)–siliceous fragments ferromanganese crusts; f — the Shevaldin Seamounts: cementation of shapeless fragments of Fe-Si-composition with manganese hydroxides

ные мелкие зерна Fe-силикатов (рис. 4, с–е). Участки развития кремнистых отложений были обнаружены в корках возвышенности Первенец и Медведева (рис. 4, b, e, f), а также наложенной постройки на возвышенности Южное Ямато (рис. 3, d). Цементация пелитового и песчанистого осадков гидроксидами марганца наблюдается на возвышенностях безымянной и Витязя (рис. 3, e, f).

Наиболее подробно изучены корки возвышенности Первенец (Астахова и др., 2019), представляющие собой рыхлые образования, легко разламывающиеся руками. Под стереоскопическим микроскопом видно, что они содержат большое количество включений комочков глинистого вещества зеленовато-бурого цвета (рис. 2, a, b). В нижних частях корок величина и количество этих обломков увеличивается. В некоторых случаях эти корки покрыты марганцевым слоем с почковидной структурой. Граница между слоями отчетливая. С помощью микрозондового анализа удалось выявить особенности внутреннего строения этих корок и на этом основании определить этапность рудоотложения в них. В результате проведенного анализа выявлены участки преимущественно железокремнистого, марганцево-железосиликатного и марганцевого состава (рис. 4, a; табл. 3). Во всех матрицах также присутствует примесь K, Na, Ca и Mg, сумма которых не превышает 7 %. Первичными были отложения железосиликатного состава, иногда с примесью Co до 0.22 %. Позже они были раздроблены и сцементированы

гидроксидами марганца. Прослеживается следующая этапность рудоотложения: Fe-Si → Mn-Fe-Si → Mn. Не исключено, что формирование участков марганцево-железосиликатного состава связано с пропиткой марганцем железосиликатных отложений. На это указывает частое выделение их на границе между участками Fe-Si- и Mn-состава (рис. 4, a). В таком случае этапность рудоотложения будет следующая: Fe-Si → Mn.

Помимо ЖМК на этой возвышенности встречаются пористые кремнистые корки с кавернозной поверхностью, часто покрытой тонкой пленкой гидроксидов марганца (рис. 3 a, b). Они образовались в результате цементации аморфным кремнеземом комочков зеленого цвета. Стенки пустот выстланы щетками мельчайших кристаллов кварца. Изредка поры в них заполнены гидроксидами марганца, иногда с примесью бария до 5 % (рис. 4, b; табл. 3). Здесь также первичны были отложения железосиликатного состава, сцементированные аморфным кремнеземом. Таким образом, изменение химического состава рудообразующего раствора происходило следующим образом: Fe-Si → Si → Mn.

Похожую картину мы наблюдаем в рудных отложениях горы Петра Великого и возвышенностей Васильковского и Шевалдина (рис. 2, с–f). Там также присутствует значительное количество зеленых зерен железосиликатного состава, сцементированных гидроксидами железа и марганца, марганцем или аморф-

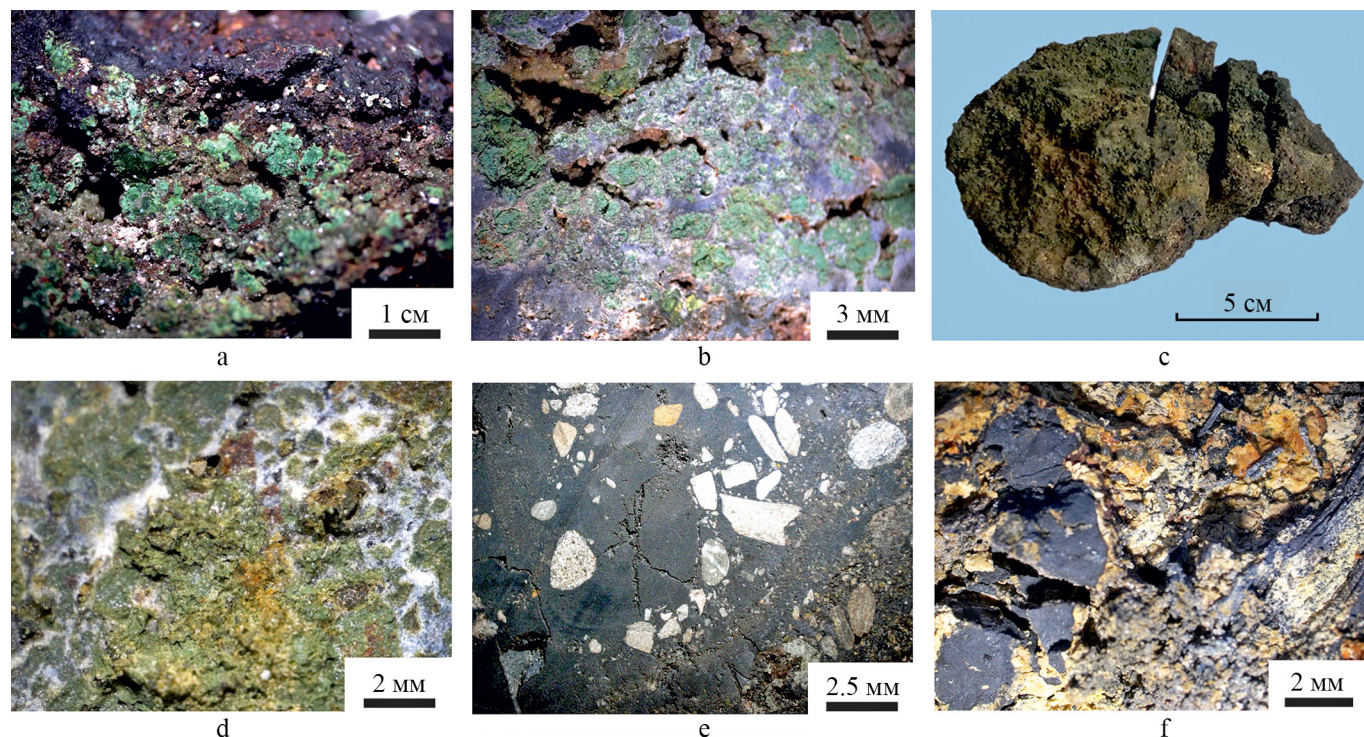


Рис. 3. Кремнисто-марганцевые корки Японского моря:

a–b — возвышенности Первенец: a — общий вид кремнистой корки, b — цементация аморфным кремнеземом бесформенных комочков Fe-Si-состава; c, d — наложенная постройка на возв. Южное Ямато: c — общий вид кремнистой корки, d — цементация кремнеземом зерен Fe-Si-состава; e — цементация терригенных зерен гидроксидами марганца (возвышенность Витязя); f — тонкие слои тодорокита в глинистом осадке (безымянная возвышенность)

Fig. 3. The silicon-manganese crusts of the Sea of Japan:

a–b — the Pervenets seamounts: a — general view of the siliceous crust, b — cementation of Fe-Si grains with amorphous silica; c, d — the Peter the Great Seamount: c–d — superimposed edifice on South Yamato Rise: c — general view of the siliceous crust, d — cementation of Fe-Si grains with silica; e — the Vityaz Seamount: cementation of terrigenous grains by hydroxides of manganese; f — the unnamed Seamount: thin layers of todorokite in clay sediment



ным кремнеземом. Зеленовато-бурая окраска этих зерен чаще отмечается в марганцевых корках.

В ЖМК центральной части возвышенности Беляевского (ст. 2069) выделяются участки железокремнистого и марганцевого состава, иногда с примесью железа, кремния или бария, (табл. 3; рис. 4, с). Отложения марганца более поздние по отношению к железокремнистым. Также встречаются участки, где на матрице железокремнистого состава обнаружены пятнистые вы-

деления барита. В то же время выявлены полосчатые участки марганца, содержащие до 6.5 % бария (Астахова и др, 2010). Вероятная этапность рудоотложения следующая: Fe-Si → BaSO₄ (?) → Mn, Mn-Ba.

При драгировании вулканической возвышенности (наложенной постройки), расположенной на северном окончании хребта возвышенности Южное Ямато, были подняты марганцевые и железокремнистые образования. В марганцевых корках этого райо-

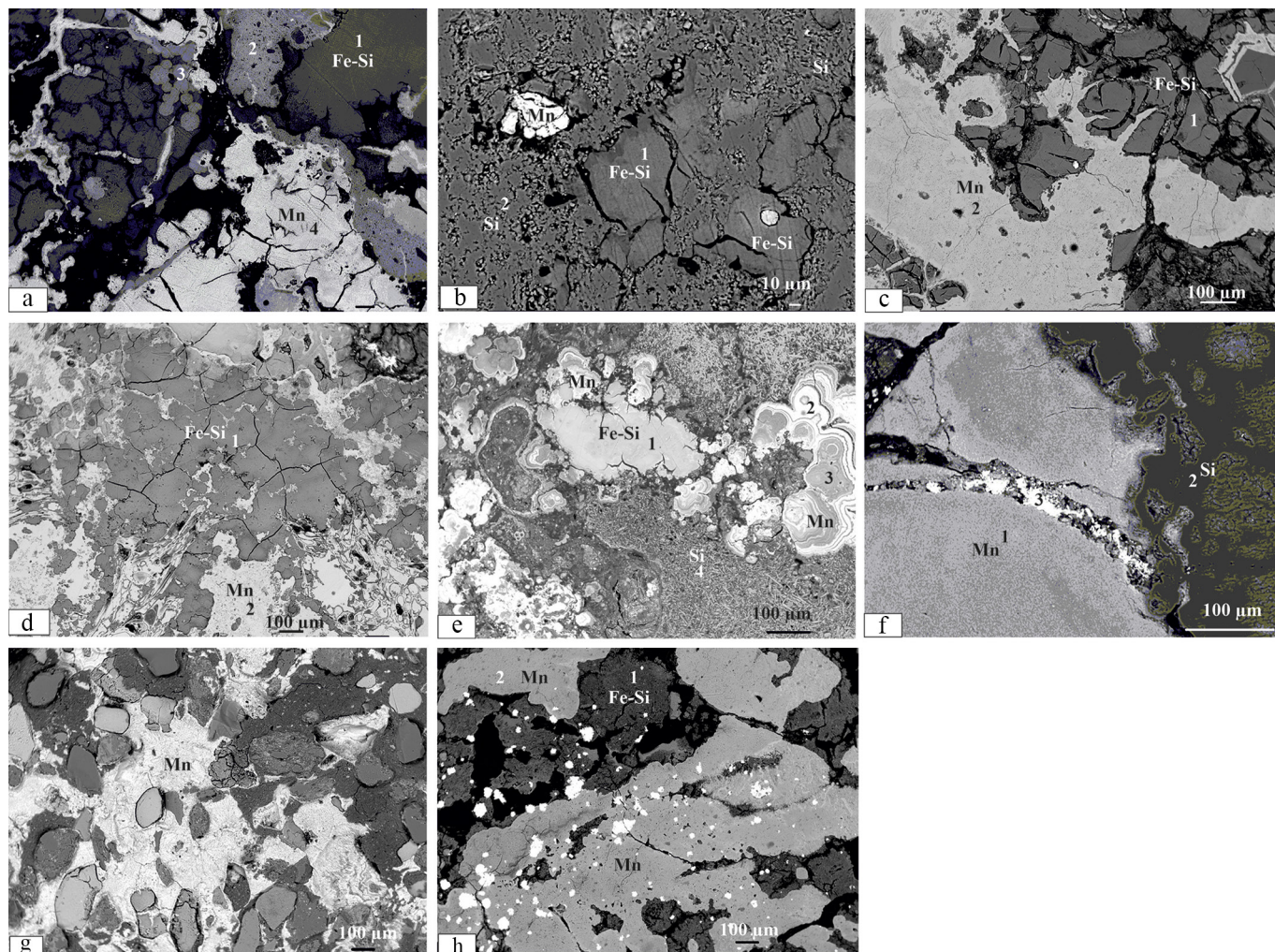


Рис. 4. Микротекстуры железокремнисто-марганцевых корок Японского моря:

a, b — возвышенности Первенец: а — цементация зерен Fe-Si-состава железомарганцево-кремнистыми отложениями и гидроксидами марганца, b — зерна Fe-Si-состава в кремнистом цементе, в порах — более поздние выделения гидроксидов марганца; c, d — цементация гидроксидами марганца железокремнистых отложений: c — возвышенности Беляевского, d — наложенная постройка на возв. Южное Ямато; e — цементация кристаллическим кремнеземом железокремнистых отложений, на поверхности кремния выделяются наложенные почковидные выделения гидроксидов марганца (возвышенность Медведева, ст. 1344); f — взаимоотношение марганцевой и кремнистой матриц, в марганцевой — трещина, залеченная кристаллическим баритом (возвышенность Медведева, ст. 1471); g — цементация терригенных зерен гидроксидами марганца (возвышенность Витязя); h — железокремнистые отложения (осадок) перекрыты железокремнисто-марганцевыми, многочисленные белые пятна — барит (безымянная возвышенность). Цифрами обозначены участки микрозондового анализа (табл. 3)

Fig. 4. Microstructures the ferrosiliceous-manganese crusts of the Sea of Japan:

a, b — the Pervenets seamounts: a — cementation of Fe-Si grains with iron-manganese-silicon deposits and manganese hydroxides, b — Fe-Si-grains in silica cement, in the pores — later discharge of manganese hydroxides; c, d — manganese hydroxide cement in the ferrosiliceous sediments: c — the Belyaevsky Seamounts, d — superimposed edifice on South Yamato Rise; e — cemented with crystal silica of iron-silicate deposits. On the surface of the flint are superimposed kidney-shaped deposits of manganese hydroxide (the Medvedev Seamount, st. 1344); f — the ratio of the silicon and the manganese matrix. In the manganese one, a crack cured by crystal barite (the Medvedev Seamount, st. 1471); g — cementation of terrigenous grains by hydroxides of manganese (the Vityaz Seamount); h — ferrosiliceous deposits (sediment) overlain by ferrosiliceous-manganese ones, barite is observed as numerous white spots of different sizes (the unnamed Seamount). Numbers indicate the areas of point analysis (Table 3)



на обнаружены единичные раздробленные участки железокремнистого состава в марганцевой матрице (рис. 4, d; табл. 3). На поверхности образца много призматических и таблитчатых кристаллов барита размером 1–2 мм. Мелкие зерна барита присутствуют также в марганцевой матрице. Часто в гидроксидах марганца присутствует примесь бария (до 1.8 %). Железосиликатные образования представляют собой округлые удлиненные стяжения серо-зеленого цвета, длиной до 10 см (рис. 3, c). Они сформировались в результате цементации кремнеземом бесформенных кусочков зеленой глины железокремнистого состава (рис. 3, d) с незначительной примесью K, Mg, Cl, Na, реже Al и Ca (Ярошук, Астахова, 2017). Среди этой массы изредка отмечаются мелкие выделения гидроксидов марганца вдоль тонких трещин. По-видимому, эти образцы формировались на разном удалении от устья гидро-

термального выхода. Вероятно, изменение химического состава рудообразующего раствора происходило следующим образом: $\text{Fe-Si} \rightarrow \text{Si} \rightarrow \text{Mn} \rightarrow \text{Ba}$.

Детально изучались два образца ЖМК, поднятые при драгировании южного (ст. 1344) и восточного (ст. 1471) склонов возвышенности Медведева. Несмотря на то, что на других станциях драгирования поднимались кварц-глауконитовые породы, а в песчаных осадках присутствовало значительное количество глауконита (Липкина и др., 1987), единичные зерна Fe-Si-состава были обнаружены в образце 1344 (рис. 4, e; табл. 3). Эти зерна сцементированы кристаллическим кремнеземом, на поверхности которого выделяются наложенные почковидные выделения гидроксидов марганца.

Другое строение имеет образец 1471 (рис. 4, f; табл. 3). Здесь первичны были отложения гидроксидов марганца, трещины в котором заполнены более позд-

Таблица 3. Результаты микрозондового анализа (вес. %) аншлифов рудных корок Японского моря

Table 3. The results of microprobe analysis (wt. %) of polished sections of ore crust of the Sea of Japan

№	Mn	Fe	Si	O	K	Mg	Na	Ca	Al	Cl	F	P	S	Ba	Sr	Ti	Ni	Σ
Рис. 4, a / Fig. 4, a																		
1	–	16.2	23.5	40.6	4.8	3.2	0.7	–	–	0.3	–	0.3	–	–	–	–	–	89.7
2	8.1	16.5	21.4	38.1	4.6	3.0	1.1	0.4	0.5	0.3	–	0.3	–	–	–	–	–	94.3
3	20.6	12.6	14.6	33.6	3.5	2.4	1.2	0.6	0.6	0.4	–	–	–	–	–	–	–	89.9
4	50.3	0.5	–	31.3	3.2	0.6	2.9	1.3	0.2	0.2	–	0.2	–	–	–	–	–	90.6
5	50.1	–	–	32.9	4.4	1.5	2.4	1.5	–	0.2	–	0.3	–	–	–	–	–	93.2
Рис. 4, b / Fig. 4, b																		
1	–	14.4	18.9	28.1	5.5	2.6	–	–	–	0.3	–	–	–	–	–	–	–	69.7
2	–	0.8	45.6	53.9	0.2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100.5
3	49.6	2.3	1.1	33.0	1.3	1.6	1.3	0.7	–	–	–	–	–	1.8	–	–	–	92.7
Рис. 4, c / Fig. 4, c																		
1	0.6	19.7	22.1	29.5	2.4	1.7	1.3	–	0.9	–	–	–	–	–	–	–	–	78.2
2	42.4	1.9	2.6	32.1	1.2	2.0	1.8	0.5	0.6	0.5	–	–	–	–	–	0.4	–	86.0
Рис. 4, d / Fig. 4, d																		
1	0.3	12.0	19.6	40.5	3.4	1.6	2.7	–	3.4	1.8	–	–	–	–	–	–	–	85.3
2	48.3	0.9	–	28.3	1.0	1.7	1.5	0.6	–	0.7	–	–	–	1.7	–	–	–	84.5
Рис. 4, e / Fig. 4, e																		
1	–	24.4	22.6	37.1	2.3	1.8	0.6	0.4	1.2	–	–	–	–	–	–	–	–	90.4
2	42.7	0.8	–	31.2	0.9	2.8	2.1	1.2	0.4	0.4	–	–	–	–	–	–	–	82.4
3	29.6	1.6	–	16.0	0.7	2.8	1.4	1.1	0.9	0.3	–	–	0.2	0.6	–	–	0.5	55.8
4	–	–	46.5	51.6	–	–	–	0.4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	98.4
Рис. 4, f / Fig. 4, f																		
1	39.0	–	–	20.2	1.1	1.8	1.7	0.5	0.4	0.5	1.1	–	–	–	–	0.2	–	66.6
2	–	–	44.9	46.7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	91.6
3	0.4	0.5	–	21.8	–	–	–	0.2	–	–	–	–	13.2	50.3	5.3	–	–	91.8
Рис. 4, g / Fig. 4, g																		
1	51.6	–	–	33.2	1.6	2.6	2.8	0.7	–	0.7	8.0	–	0.3	1.4	–	–	–	102.5
Рис. 4, h / Fig. 4, h																		
1	0.7	8.4	23.5	35.2	2.7	3.2	0.6	–	–	0.2	–	–	0.5	–	–	–	–	75.0
2	38.3	2.9	4.7	28.2	1.0	1.9	2.1	–	–	0.5	–	–	0.3	–	–	–	–	79.8

Примечание: так как основная масса рудных корок рыхлая, то при микрозондовом анализе сумма элементов часто получается менее 100 %. Цифрами обозначены участки микрозондового анализа (рис. 4)

Note: Since most of the ore crusts are loose, the total content of elements determined on microprobing is often less than 100 %. Numbers indicate the areas of the microprobe analysis (Fig. 4)



ним баритом. Затем это все было перекрыто аморфным кремнеземом. Этапность рудообразования в этом случае следующая: $Mn \rightarrow Ba \rightarrow Si$. Перекрытие гидроксидов марганца более высокотемпературными отложениями диоксида кремния можно объяснить возобновлением гидротермальной деятельности в этом районе. Так как вулканизм на подводных возвышенностях Японского моря периодически возобновлялся в течение продолжительного времени начиная со среднего миоцена (Берснев и др., 1987; Леликов и др., 2001), то и приуроченная к нему поствулканическая гидротермальная деятельность носила пульсирующий характер.

Повышение содержания кремнезема в ЖМК также может быть связано с включением терригенного материала. Так, в корке возвышенности Витязя содержание Si достигает 13 % за счет цементации зерен песчаной размерности, в том числе кварца, гидроксидами марганца, практически не содержащими примеси Si и Fe (рис. 3, е; 4, г; табл. 3).

В ЖМК, поднятых при драгировании безымянной возвышенности, содержание Si варьирует от 0.36 до 13.23 %. Максимальное содержание кремния отмечено в образце, образованном в результате переслаивания рыжих глинистых слоев и черных прослоев тодорита мощностью 1–5 мм (рис. 3, ф) (Астахова и др. 2015). Вероятнее всего, это произошло вследствие пульсирующего поступления гидротермальных растворов в глинистые отложения на склоне вулканической возвышенности. В результате этого, по данным микронзондового анализа, в глинистом железокремнистом осадке образовались пятна железокремнисто-марганцевого состава и многочисленные выделения кристаллического барита (рис. 4, h; табл. 3).

Особенности формирования кремнистой минерализации в железомарганцевых корках на подводных вулканах Японского моря

Начиная с 70-х годов прошлого столетия в экспедициях ТОИ ДВО РАН при драгировании привершинных участков подводных вулканических возвышенностей глубоководных котловин Японского моря более чем на 40 станциях поднимались предположительно гидротермальные породы, которые описывались как кремнисто-глауконитовые образования. Для уточнения их генезиса предыдущими исследователями были отобраны 47 мономинеральных проб из 10 районов, и кроме определения химического состава и аморфного железа они были изучены методами рентгеновского и электронографического анализов, ИК-спектроскопии и изотопно-кислородным методом (Липкина и др., 1987). Среди отобранных проб были также образцы с возвышенностей Первенец и Медведева. По данным кристаллохимических исследований выявлено, что образцы с этих возвышенностей относятся к 4 группам слоистых силикатов: 1 — гидрослюдистые минералы глауконит-селадонитового типа, 2 — смешанослойные минералы глауконит-селадонитового типа, 3 — смешанослойные минералы слюдopodobные, 4 — смешанослойные минералы смектит — слюда (Липкина и др., 1987). На возвышенности Первенец преобладают минералы 1 и 2 групп, на возв. Медведева — 3.

В результате проведенных исследований был сделан вывод: «комплексное изучение слюдистых минералов из вулканических областей Японского моря позволило установить, что особенности гидротермального генезиса материнских пород нашли свое отражение в кристаллохимической специфике этих минералов, которые в основном представлены селадонитами, а глаукониты имеют тетраэдрический заряд (на формульную единицу), близкий к верхней границе этого заряда у селадонитов» (Липкина и др., 1987). Температура образования кварц-глауконитовых стяжений, определенная изотопно-кислородным методом, находится в пределах 42–58° (Липкина и др., 1987).

Следовательно, образование железистых слоистых силикатов на подводных возвышенностях Японского моря связано с гидротермально-осадочным процессом. Кремнезем поступает в гидротермальный раствор в виде отдельных молекул кремниевых кислот в результате химического взаимодействия воды с алюмосиликатными минералами вулканических пород в зонах тепловых аномалий при повышенной температуре (до 250–350 °C) и давлении. Гидротермальные растворы, содержащие значительное количество кремнекислоты, обладают высокой адсорбционной емкостью по отношению к катионам различных металлов. После соединения с катионами металлов они не коагулируют, а образуют гель по мере понижения температуры гидротерм во время рассеяния тепла в окружающие породы, при парообразовании и смешении растворов с холодными водами (Рычагов и др., 2005). Вероятно, образование Fe-слюд происходит при отложении этого железокремнистого геля на склонах подводных вулканов в районах выхода гидротермальных растворов. Эффективное отложение кремнезема в виде скрытокристаллического кварца и халцедона происходит при смешивании гидротерм, насыщенных кремнекислотой, с морской водой (Рычагов и др., 2005). Дальнейшая тектоническая активность, сопровождающая повторную вулканическую деятельность на подводных возвышенностях Японского моря, привела к разрушению железокремнистых отложений и переносу их вниз по склону. На это указывает наличие обломков кремнисто-глауконитовых пород и зерен глауконита в песчаных осадках (Липкина и др., 1987). Отложения марганца более поздние по отношению к железистым слюдам и аморфному кремнезему и, вероятно, происходят на некотором удалении от устья гидротермального источника. В гидроксидах марганца часто в виде примеси присутствует барий, а в марганцевой матрице почти всех изученных образцов обнаружены мелкие зерна барита. В некоторых случаях он полностью или частично заполняет трещины в отложениях гидроксидов марганца. Особенности выделения барита позволяют говорить, что процесс баритообразования является наложенным и происходит в последнюю стадию формирования ЖМК. Перекрытие аморфным кремнеземом отложений гидроксидов марганца с трещинами, заполненными баритом (возв. Медведева, ст. 1471, рис. 4, ф), вероятно, связано с пульсирующим характером вулканизма и возобновлением гидротермальной деятельности в этом районе.



Выводы

1. Детальное изучение гидротермальных железомарганцевых образований, сформировавшихся на привершинных склонах подводных вулканических возвышенностей Японского моря, показало, что они имеют неоднородный химический состав. Главными породообразующими химическими элементами в их составе являются Mn (0.2–63.1 %, среднее — 34.1 %), Fe (0.01–42.5 %, среднее — 6.6 %) и Si (0.4–37.9 %, среднее — 10.2 %). Значение Fe/Si изменяется от 0.01 до 5.5 (среднее — 0.7); Mn/Si — от 0.01 до 177.5 (среднее — 24.0).

2. Содержание кремния существенно различается не только в образцах, отобранных на разных участках развития железомарганцевой минерализации, но и в образцах, поднятых на одних и тех же возвышенностях. Причем среди материала драгирования на одной и той же станции могут находиться как марганцевые корки, так и железокремнистые с примесью гидроксидов марганца. Это можно объяснить длительностью интервала драгирования в сотни метров вверх по склону и протяженностью возвышенностей в десятки километров.

3. Кроме железокремнистых корок, образованных зернами предположительно глауконита, сцементированного кварцем, высокое содержание кремния имеют корки, где этот же глауконит сцементирован гидроксидами марганца. Повышенное содержание Si имеют образцы, в которых наряду с марганцевой матрицей встречаются участки железокремнистого состава, аморфного кремнезема или происходит пропитка осадка гидроксидами марганца.

4. Образование Fe-слюдов происходит при отложении железокремнистого геля из гидротермальных растворов на склонах подводных вулканов в местах их выхода. Эти отложения первичны по отношению к марганцевым. При дальнейшем поступлении более низкотемпературных растворов эти отложения могут размываться и переноситься вниз по склону.

5. Вероятно, изменение химического состава рудообразующего раствора на подводных возвышенностях Японского моря происходило следующим образом: Fe-Si → Si → Mn → Ba. В некоторых случаях наблюдается искажение этой закономерности, что связано, скорее всего, с пульсирующим поступлением гидротермального раствора из-за повторной вулканической деятельности.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории рентгеновских методов ДВГИ ДВО РАН А. А. Карабцову и Г. Б. Молчановой за помощь в проведении микронзондовых анализов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (тема 124022100084-8).

Литература / References

Астахова Н. В. Железомарганцевые корки центральной котловины Японского моря // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 5. С. 384–396. DOI: 10.1134/S0024497X18050026
Astakhova N. V. Ferromanganese crusts in the Central Basin, Sea of Japan. Lithology and Mineral Resources, 2018, V. 53, No. 5, pp. 349–360. DOI: 10.1134/S0024490218050024

Астахова Н. В., Введенская И. А. Химический состав и генезис железомарганцевых образований подводных вулканов и возвышенностей Японского моря // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 36–43.

Astakhova N. V., Vvedenskaya I. A. Chemical composition and genesis of ferromanganese deposits of underwater volcanoes and seamounts of the Sea of Japan. Volcanology and Seismology, 2003, No. 6, pp. 36–43 (in Russian).

Астахова Н. В., Колесник О. Н., Съедин В. Т. Цветные, благородные и редкоземельные металлы в железомарганцевых корках и базальтах возвышенности Беляевского (Японское море) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. № 16. С. 231–245.

Astakhova N. V., Kolesnik O. N., S'edin V. T. Nonferrous, noble and rare-earth metals in ferromanganese crusts and basalts from the Belyaevsky Seamount (Sea of Japan). Vestnik KRAUNTs, Earth Sciences, 2010, No. 2 (16), pp. 231–245 (in Russian).

Астахова Н. В., Колесник О. Н., Съедин В. Т. Рудная минерализация в вулканических породах подводных возвышенностей Японского моря // Геохимия. 2014. № 2. С. 158–177. DOI: 10.7868/S0016752514020034

Astakhova N. V., Kolesnik O. N., S'edin V. T. Ore mineralization in volcanic rocks from the submarine rises of the Sea of Japan. Geochemistry International, 2014, V. 52, No. 2, pp. 144–161. DOI: 10.1134/S0016702914020037

Астахова Н. В., Лопатников Е. А., Можеровский А. В., Ярошук Е. И. Гидротермальные образования возвышенности Первенца (Японское море) // Вулканология и сейсмология. 2019. № 4. С. 29–39. DOI: 10.31857/S0203-03062019429-39.

Astakhova N. V., Lopatnikov E. A., Mazherovsky A. V., Yaroshchuk E. I. Hydrothermal formations on the Pervnets Rise, Japan Sea. Journal of Volcanology and Seismology, 2019, V. 13, No. 4, pp. 226–234. DOI: 10.1134/S074204631904002X

Астахова Н. В., Съедин В. Т., Можеровский А. В., Лопатников Е. А. Первая находка массивного пиролюзита в глубоководной котловине Японского моря // ДАН. 2015. Т. 462. № 1. С. 68–72

Astakhova N. V., S'edin V. T., Mozherovsky A. V., Lopatnikova E. A. The first find of massive pyrolusite in a deep-water basin of the Sea of Japan. Doklady Earth Sciences, 2015, V. 462, No. 1, pp. 453–457.

Батулин Г. Н. Геохимия гидротермальных железомарганцевых корок Японского моря // ДАН. 2012. Т. 445. № 2. С. 179–184.

Baturin G. N. Geochemistry of hydrothermal manganese crusts of the Sea of Japan. Doklady Earth Sciences, 2012, V. 445, No. 2, pp. 179–184 (in Russian).

Берснев И. И., Леликов Е. П., Безверхний В. Л. и др. Геология дна Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 140 с.

Bersenev I. I., Lelikov E. P., Bezverkhniy V. L. et al. Geology of the Sea of Japan Floor. FESC USSR AS, Vladivostok, 1987, 140 p. (in Russian).

Колесник О. Н., Ярошук Е. И. Марганцевое рудообразование на подводной возвышенности Беляевского в Японском море (обзор литературы и новые данные) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 4. Вып. № 44 С. 93–109. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-4-44-93-109.



- Kolesnik O. N., Yaroshchuk E. I. Manganese mineralization on Belyaevsky Seamount, the Sea of Japan: Literature review and new data. *Vestnik KRAUNTs, Earth Sciences*, 2019, No. 4 (44), pp. 93–109 (in Russian).
- Леликов Е. П., Емельянова Т. А., Сьедин В. Т., Аракелянц М. М., Лебедев В. А. Новые данные по радиоизотопному датированию вулканитов Японского и Охотского морей // Тихоокеанская геология. 2001. № 5. С. 118–122.
- Lelikov E. P., Emelyanova T. A., S'edin V. T., Arakelyants M. M., Lebedev V. A. New data on geochronological dating of the volcanics of the Japan and Okhotsk seas. *Pacific Geol.*, 2001, No. 5, pp. 118–122 (in Russian).
- Леликов Е. П., Цой И. Б., Ващенко Н. Г. и др. Геология и основные типы горных пород дна Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 2006. 93 с.
- Lelikov E. P., Tsoy I. B., Vashchenkova N. G. et al., *Geology and basic types of rocks of the Sea of Japan Floor*. Vladivostok: Dalnauka, 2006, 93 p. (in Russian).
- Липкина М. И., Дриц В. А., Ципурский С. И. и др. Высокожелезистые диоктаэдрические слоистые силикаты из гидротермальных пород и осадков вулканических построек Японского моря // Известия АН СССР, серия геологическая. 1987. № 10. С. 92–111.
- Lipkina, M. I., Drits, V. A., Tsiursky, S. I., et al., High-Fe dioctahedral layered silicates from hydrothermal rocks and sediments in volcanic structures in the Sea of Japan. *Izvestiya AN SSSR, Ser. Geol.*, 1987, No. 10, pp. 92–111 (in Russian).
- Михайлик П. Е., Михайлик Е. В., Зарубина Н. В. и др. Вещественный состав и распределение РЗЭ в железомарганцевых корках подводных возвышенностей Беляевского и Медведева (Японское море) // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 5. С. 3–16.
- Mikhailik P. E., Mikhailik E. V., Zarubina N. V. et al. Composition and distribution of REE in ferromanganese crusts of the Belyaevsky and Medvedev seamounts in the Sea of Japan. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2014, V. 8, No. 5, pp. 315–329.
- Можеровский А. В., Грамм-Осипов Л. М., Волкова Т. И., Можеровская Л. В. Минералогические особенности железомарганцевых образований Японского моря // Новые данные по геологии западной части Тихого океана. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 135–139.
- Mozherovskii A. V., Gramm-Osipov L. M., Volkova T. I., Mozherovskaya L. V. Mineralogical features of ferromanganese deposits of the Sea of Japan. In: *New Geological Data on the Western Pacific*. Vladivostok: FEB USSR AS, 1989, pp. 135–139 (in Russian).
- Рычагов С. Н., Главатских С. Ф., Сандимирова Е. И., Белоусов В. И. Рудные минералы в структуре гидротермально-магматических систем: состав, распределение, условия формирования // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма: Материалы международного полевого Курило-Камчатского семинара. Петропавловск-Камчатский, 2005. С. 363–379.
- Rychagov S. N., Glavatskih. S. F., Sandimirova E. I., Belousov V. I. Ore minerals in the structure of hydrothermal-magmatic systems: composition, distribution, conditions of formation. *Geothermal and mineral resources of the areas of modern volcanism. Materials of the International Field Kurilo-Kamchatka Seminar. Petropavlovsk-Kamchatsky*, 2005, pp. 363–379. (in Russian)
- Свининников А. И., Сьедин В. Т. Физические свойства пород кайнозойских вулканогенных комплексов Японского моря // Тихоокеанская геология. 1984. № 3. С. 7–15.
- Svininnikov A. I., S'edin V. T. Physical properties of the Cenozoic volcanogenic complexes of the Sea of Japan. *Pacific Ocean Geology*, 1984, No. 3, pp. 7–15 (in Russian).
- Скорнякова Н. С., Батулин Г. Н., Гурвич Е. Г. и др. Железомарганцевые корки и конкреции Японского моря // Докл. АН СССР. Т. 293. № 2. 1987. С. 430–434.
- Skornyakova N. S., Baturin G. N., Gurchich E. G. et al. Ferromanganese crusts and nodules of the Sea of Japan. *Doklady Earth Sciences*, 1987, V. 293, No. 2, pp. 430–434 (in Russian).
- Сьедин В. Т. Формационно-геохимические типы кайнозойских базальтоидов Японского моря // ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 6. С. 1441–1446.
- S'edin V. T. Formation-geochemical types of the Cenozoic basalts of the Sea of Japan. *Doklady Earth Sciences*, 1987, V. 296, No. 6, pp. 1441–1446 (in Russian).
- Ярошук Е. И., Астахова Н. В. Гидротермальные отложения на возвышенности Южное Ямато (Японское море) // Материалы XXII Международной научной конференции (школы) по морской геологии. М.: ИО РАН, 2017. Т. II. С. 289–291.
- Yaroshchuk E. I., Astakhova N. V. Hydrothermal deposits on the hill of the South Yamato (the Sea of Japan). *Geology of seas and oceans: Proceedings of XXII International Conference on Marine Geology. V. II*, Moscow: IO RAS, 2017, pp. 289–291 (in Russian).

Поступила в редакцию / Received 14.05.2025



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 551.435.44(470.1)

DOI: 10.19110/geov.2025.6.3

Литолого-палеогеографическое районирование Европейского Северо-Востока России и корреляции морен в пределах территориальных зон

Л. Н. АндреичеваИнститут геологии ФИЦ Коми НЦ Уро РАН, Сыктывкар, Россия
andreicheva@geo.komisc.ru

Впервые на основе геологических, палеогляциологических и палеогеоморфологических факторов гляциолитогенеза и их влияния на формирование состава морен проведено литолого-палеогеографическое районирование Европейского Северо-Востока России. Выделены 32 литорайона, представляющие собой элементарные единицы районирования, в пределах которых литологическая корреляция морен выполняется беспрепятственно в любом направлении. Карта литорайонов составлена с учетом результатов комплексного литологического изучения морен. Получена структурная (гранулометрическая) характеристика печорской (днепровской) и вычегодской (московской) морен среднего неоплейстоцена, исследованы минеральный состав мелкопесчаной фракции и петрография грубообломочного материала из моренных горизонтов. Минералого-петрографические особенности, ориентировка обломочного материала, руководящие породы в моренах, а также калий-аргоновые датировки валунов кристаллических пород позволяют достоверно идентифицировать местоположения питающих ледниковых провинций. Составленную схему предлагается использовать в качестве основы при проведении региональных и межрегиональных литологических сопоставлений морен.

Ключевые слова: комплексный литологический анализ, средний неоплейстоцен, морена, палеогеографические реконструкции, корреляция, литорайон, территориальная зона

Lithological-paleogeographical zonation of the European North-East of Russia and correlation of moraines within territorial zones

L. N. Andreicheva

Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

For the first time, based on geological, paleoglaciological and paleogeomorphological factors of glaciolithogenesis and their influence on the formation of the composition of moraines, the lithological and paleogeographic zoning of the European North-East of Russia was carried out. 32 littoral regions were identified, which were elementary units of zoning, within which the lithological correlation of moraines was carried out without hindrance in any direction. The map of littoral regions was compiled taking into account the results of a comprehensive lithological study of moraines. The structural (granulometric) characteristics of the Pechora (Dnieper) and Vychegda (Moscow) moraines of the Middle Neopleistocene were obtained, the mineral composition of the fine-sand fraction and the petrography of the coarse-grained material from the moraine horizons were studied. Mineralogical and petrographic features, orientation of detrital material, index rocks in moraines, as well as potassium-argon dating of boulders of crystalline rocks allowed reliable identification of locations of feeding glacial provinces. The compiled map is proposed to be used as a basis for regional and interregional lithological comparisons of moraines.

Keywords: complex lithological analysis, Middle Neopleistocene, moraine, paleogeographic reconstructions, correlation, littoral, territorial zone

Введение

Расчленение отложений квартера, корреляция моренных толщ, а также реконструкция направлений движения покровных ледников и установление границ их распространения проводятся лишь на основе результатов комплексного литологического изучения разновозрастных морен и выявления региональных особенностей их вещественного состава. Сложная природная

обусловленность при формировании состава маркирующих горизонтов морен делает их литологическую корреляцию актуальной задачей, решить которую возможно, лишь используя достоверные фактические данные с учетом биостратиграфического и литостратиграфического обоснования возрастной принадлежности моренных горизонтов. Однако при региональных сопоставлениях горизонтов основных морен по лито-

Для цитирования: Андреичева Л. Н. Литолого-палеогеографическое районирование Европейского Северо-Востока России и корреляции морен в пределах территориальных зон // Вестник геонаук. 2025. 6(366). С. 24–38. DOI: 10.19110/geov.2025.6.3

For citation: Andreicheva L. N. Lithological-paleogeographical zonation of the European North-East of Russia and correlation of moraines within territorial zones. Vestnik of Geosciences, 2025, 6(366), pp. 24–38, doi: 10.19110/geov.2025.6.3



логическому составу возникают определенные сложности, которые связаны как с пестротой состава пород питающих провинций, так и с формированием моренных горизонтов разными ледниковыми потоками. Поэтому у ряда исследователей возникают сомнения в правомочности проведения литологических корреляций. Эти сомнения преодолимы при учете факторов ледникового седиментогенеза. Возможности и ограничения межрайонной корреляции морен зависят от закономерностей зональной, секторной и провинциальной изменчивости их состава. Морены по сравнению с другими генетическими типами отложений в наибольшей степени унаследуют вещественный состав подстилающих пород на всем пути следования ледника. Формирование их состава обусловлено сложным взаимодействием различных палеогеографических факторов: гляциодинамикой покровного ледника, рельефом, составом пород доледникового субстрата и ледниковой сортировкой материала. Доледниковый рельеф, кроме того, определяет степень эрозионно-аккумулятивной деятельности ледника и его радиальную и маргинальную структуры. Тенденция возрастной перестройки минерального-петрографического спектра, сводящаяся с течением времени к сокращению доли местного и возрастанию дальнепринесенного материала, является важным литологическим показателем разновозрастности морен. Конструктивным способом решения проблемы корреляции морен является литолого-палеогеографическое районирование территории древнего материкового оледенения с выделением литорайонов по типу ледникового питания, проводить которое предложила Н. Г. Судакова (1990). Главным условием сопоставимости морен по литологическому составу является принцип единства удаленных, транзитных и местных питающих провинций.

Материал и методы исследования

В строении среднелепестового комплекса отчетливо выделяются два моренных горизонта с контрастными литологическими характеристиками, разделенные пачкой субаквальных осадков, имеющих по палинологическим данным родионовский (шкловский) возраст (Андреичева и др., 2015). Эти горизонты морен, по нашему мнению, связаны с самостоятельными ледниковыми покровами: печорским (днепровским) и вычегодским (московским). Для решения поставленных задач было проведено детальное комплексное исследование морен. На обширной территории Европейского Северо-Востока России изучен гранулометрический состав более 6500 образцов среднелепестовых основных морен, показавший, что они представлены валунными суглинками, реже — супесями и глинами с очень низкой степенью сортировки материала.

С целью выявления микротекстурных и микроструктурных особенностей, а также для уточнения минерального состава глинистой фракции морен, которая является, по сути, цементирующей массой, связывающей обломки минералов и пород, проведено петрографическое изучение около 3500 шлифов валунных суглинков. Выполнены около 1500 минералогических анализов, в результате чего выявлена изменчивость минерального состава тяжелой фракции морен, обу-

словленная их формированием за счет терригенного материала из разных питающих ледниковых провинций (удаленных транзитных и местных).

Для установления направлений движения ледниковых покровов, путей переноса валунно-галечного материала при формировании морен и местоположений питающих ледниковых провинций проведено детальное исследование петрографического состава обломков пород в 900 валунных пробах и замерена ориентировка заключенных в моренных горизонтах удлиненных обломков (более 40000 замеров). В случае возникновения визуальных затруднений идентификации породы проводилось ее микроскопическое изучение (просмотрено более 4200 шлифов обломков пород). Обломки пород размером крупнее 1 см извлекались из объема 0.25 м³ морены, а при обогащении моренных толщ крупнообломочным материалом обломки отбирались из объема 0.1 м³. Исследовались все извлеченные обломки пород из фракции 1–5 см, содержание которой в моренах обычно не превышает 5–6 %. Эта фракция наиболее представительна по разнообразию содержащихся в ней петрографических разновидностей, отражающих состав пород источников сноса, областей транзита и местных подстилающих образований. Для сопоставления моренных горизонтов по петрографическому составу все породы подразделены на крупные петрогенетические группы по методике А. И. Гайгаласа (1979). Выделены шесть групп обломков, наиболее перспективных, по нашему мнению, для расчленения и корреляции основных морен Тимано-Печоро-Вычегодского региона. Особый интерес для установления питающих провинций представляют обломки пород весьма характерного внешнего облика и имеющие узколокальное распространение — так называемые руководящие валуны (Кристаллические..., 1971).

Литолого-палеогеографическое районирование с выделением литосекторов, литоморфоструктур, литопровинций и литорайонов было впервые выполнено нами на Европейском Северо-Востоке России. Составлены схема литолого-палеогеографического районирования (рис. 1) и легенда к ней — классификационная сетка литорайонов, отражающая зональные и аazonальные факторы ледникового литогенеза (табл. 1). Зональные факторы ледникового литогенеза показаны на карте в виде ледораздельных зон 1 и 2 порядков. Аazonальные факторы представлены крупными литоморфоструктурами и геологическими полями пород местных питающих провинций. На территории исследований два крупных ледниковых потока (литосектора) — Беломорский и Поморский — разграничены линией ледораздела первого порядка. В пределах литосекторов выделены 32 литорайона, являющиеся элементарными единицами районирования, где литологическая корреляция морен по причине сходства факторов литогенеза выполняется беспрепятственно в любом направлении. Это позволяет достаточно корректно определять стратиграфическую приуроченность морен и проводить их межрегиональные сопоставления. На Европейском Севере России выделены четыре территориальные зоны (А, В, С и D), в рамках которых важным представляется установление и обоснование региональных литологических критериев расчленения и корреляции среднелепестовых

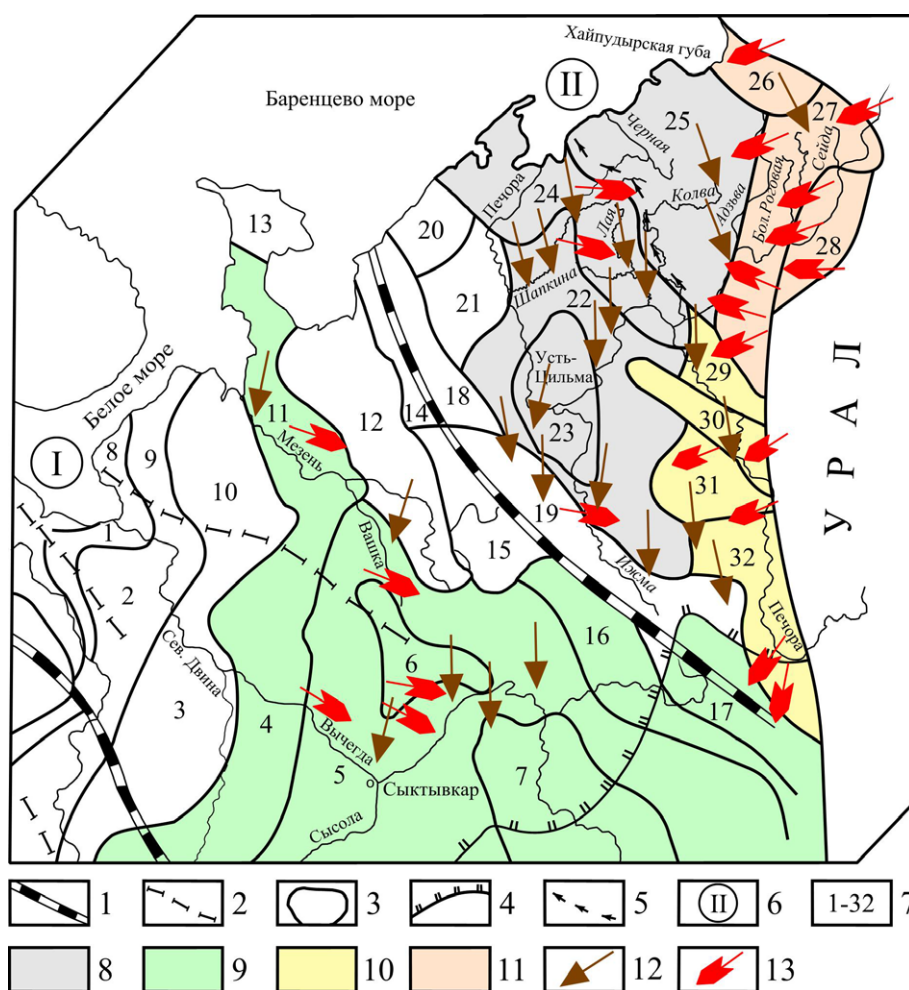


Рис. 1. Схема литолого-палеогеографического районирования Европейского Северо-Востока России: 1–2 — границы ледоразделов: 1 — первого порядка, 2 — второго порядка; 3 — границы литорайонов; 4 — граница вычегдского оледенения; 5 — предполагаемая зона сочленения вычегдских ледников; 6 — номер литосектора: I — Беломорский, II — Поморский; 7 — номера литорайонов; 8–11 — территориальные зоны: 8 — зона А, 9 — зона В, 10 — зона С, 11 — зона D; 12–13 — ориентировка удлиненных обломков пород: 12 — в печорской морене, 13 — в вычегдской морене

Fig. 1. Scheme of lithological-paleogeographic zoning of the European North-East of Russia: 1–2 — ice divide boundaries: 1 — first order, 2 — second order; 3 — littoral boundaries; 4 — boundary of the Vychegda glaciation; 5 — supposed junction zone of the Vychegda glaciers; 6 — lithosector number: I — Belomorsky, II — Pomorsky; 7 — littoral numbers; 8–11 — territorial zones: 8 — zone A, 9 — zone B, 10 — zone C, 11 — zone D; 12–13 — orientation of elongated rock fragments: 12 — in the Pechora moraine, 13 — in the Vychegda moraine

морен, подтверждающих их самостоятельность. **Зона А** включает северо-западную и центральную части Печорской низменности — литорайоны 22–25 (рис. 1). Литорайоны 4–7, 16 и 17 входят в состав **зоны В**, занимающей в основном долину р. Вычегды, а также междуречье Мезени и Вашки (литорайон 11). На крайнем северо-востоке территории исследований находится **зона С**, включающая литорайоны 26–28. На меридиональном отрезке средней Печоры литорайоны 29–32 объединены в **зону D**.

Результаты исследований и их обсуждение

В пределах каждой из выделенных территориальных зон основные морены характеризуются определенным комплексом литологических характеристик, наиболее важной из которых является структура морены — ее гранулометрический состав, формирующийся в процессе экзарационно-аккумулятивной деятельности покровного ледника. В результате ледниковой

транспортировки дальнопринесенный, транзитный и местный материал на всем пути движения ледника перемешивается, образуя как бы усредненную пробу пород и обуславливая гранулометрический и вещественный состав морены. Однако, на структуру морен, особенно нижних горизонтов, наиболее значительно влияют подстилающие породы, что вполне отчетливо проявляется в ее территориальной изменчивости (Рухина, 1973). Тесная связь гранулометрического состава основных морен с подстилающими породами наблюдается в большинстве разрезов на Северо-Востоке Европейской России. Наглядные примеры такой структурной связи отложений рассмотрены в нашей недавней работе (Андреичева, 2023). В региональном плане в направлении с севера на юг средний диаметр зерен морены возрастает, что находится в прямой зависимости от гранулометрического состава пород доледникового субстрата: мелко- и тонкозернистых пород юры и мела на севере региона до крупно-грубозернистых пермо-триасовых песчаников и гравелитов на юге.



Таблица 1. Классификационная сетка к схеме литорайонов Европейского Севера России

Table 1. Classification grid for the scheme of littoral areas of the European North of Russia

Морфоструктуры Morphostructures	Возраст подстилающих пород Age of underlying rocks	Литосекторы / Lithosectors				
		Беломорский Belomorsky		Поморский Pomorsky		
		Литорайоны / Lithoregions				
Онежско- Беломорско- Кулойское плато Onezhsko-Belomorsko-Kuloyskoe plateau	C ₁ C ₁₋₂ P ₁ -P ₂	1	1	8 9 10		
Центральное карбоновое плато Central carbon plateau	C ₁ -C ₂	2	2			
Сухоно-Кубенский склон Sukhono-Kubensky slope	P ₂ -T ₁	4				
	P ₂ t ₂ +T ₁	5				
Онего-Двинское плато Onego-Dvinskoe plateau	P ₁ +P ₂ n-kz	3				
Сухоно-Двинское плато Sukhono-Dvinskoe plateau	P ₂ t	4				
	P ₂	5				
Мезенско-Вычегодское плато Mezensko-Vychegodskoe plateau	P ₂ t+T	5	5			
	J ₃ v	6				
Сысольское плато Sysolskoe plateau	J ₃ cl				7	7
Мезенская равнина Mezenskaya plain	P ₂ t ₁		11			
	P ₂ t+T ₁ +J ₂₊₃ +K ₁		12			
Тиманский кряж Timan ridge	PR ₃ +D ₃ +C ₃ +P ₁₋₂			13		
	D			14		
	PR ₃ +C+P			15		
	P ₂ kz			16		
	C+P			17		
	D ₃ +C			18		
	D ₃ +C			19		
Печорская низина Pechora depression	P ₁ as-a				20	
	T				21	
	J ₃				22	
	K ₁				23, 24	25
	T					26
	O+S+D+C+P					27
	K ₂					28
	T ₃					29
	D ₃ +C ₁ +P ₂					30
	T+J ₂₋₃					31
	P ₁₋₂					32

Печорская (днепровская) морена обычно выступает в цоколях береговых обнажений. На крайнем севере региона печорский горизонт обычно залегает ниже урезом рек, лишь изредка выступая в разрезах береговых обнажений, видимая мощность его не превышает 5–10 м. В южном направлении на широтном отрезке р. Печоры она увеличивается до 20 м, иногда достигает 40 м.

В **зоне А**, куда входят долины рек Черной, Шапкиной и Лаи, дочетвертичные образования представлены преимущественно нижнемеловыми морскими гли-

нистыми породами: серыми и зеленовато-серыми алевритами и темными (до черных) глинами, а также отложениями верхней юры: алевритами, глинистыми песчаниками с редкими прослоями горючих сланцев и известково-кремнистых опоковидных глин. Кроме того, в ряде случаев морены унаследовали состав межледниковых четвертичных отложений различного генезиса: озерных, аллювиальных и морских. Южнее — на широтном отрезке нижней Печоры и в бассейнах Колвы и Ижмы — четвертичные отложения подстилаются породами мезозоя широкого грануло-



метрического спектра: от глин и алевролитов до баррем-аптских желтых песков, песчаников и конгломератов, а также зеленовато-серых (до ржаво-бурых) с поверхности известковистых песчаников. Западнее, на междуречье Мезени и Вашки (Удора), дочетвертичные образования представлены верхнепермскими терригенными и карбонатными породами, а также конгломератами, песчаниками, алевролитами и пестроцветными глинами нижнего триаса. По этой причине гранулометрический состав печорской мо-

рены в пределах зоны А изменчив (табл. 2, рис. 2). Так, на междуречье Мезени и Вашки в печорской морене, залегающей на песчаниках и конгломератах триаса, повышено содержание гравийно-песчаной фракции до 63.1 % и она характеризуется самой грубой структурой с d_{cp} , равным 0.070 мм. Во всех остальных районах зоны А песчаная, алевролитовая и глинистая составляющие меняются существенно при незначительных содержаниях и вариациях гравийной фракции (0.5–1.8 %).

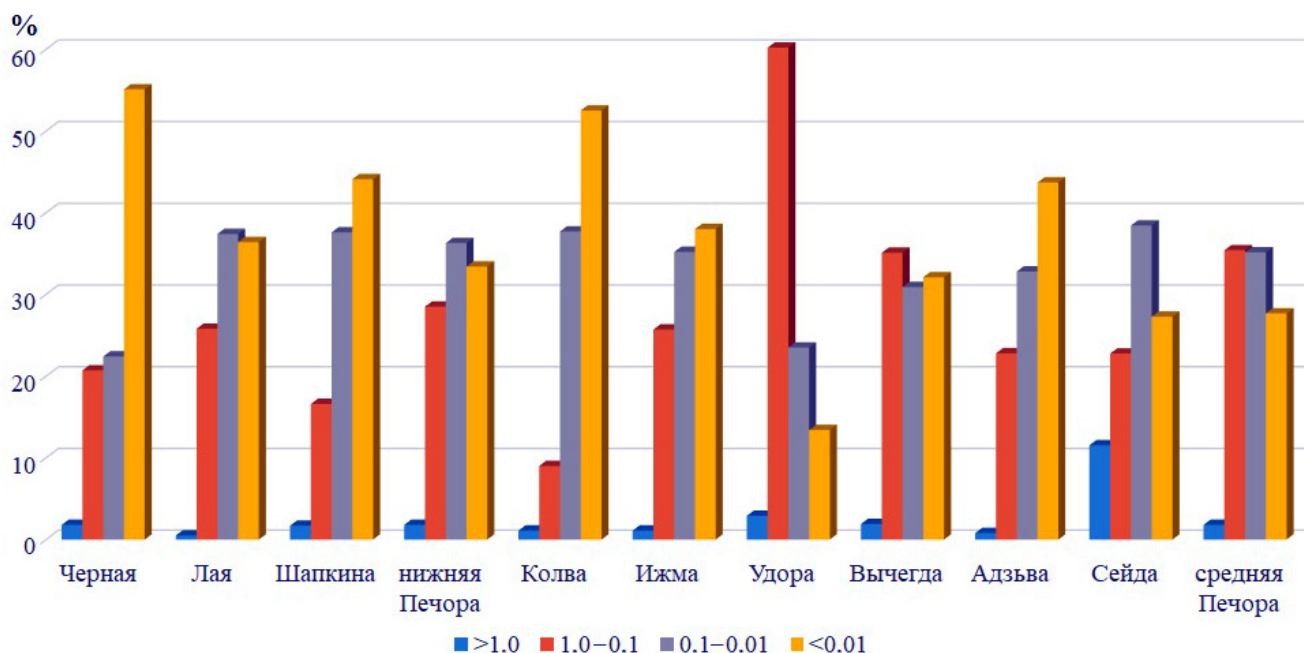


Рис. 2. Гранулометрический состав печорской морены на Европейском Северо-Востоке России

Fig. 2. Granulometric composition of the Pechora moraine in the European North-East of Russia

Таблица 2. Гранулометрический состав печорской морены на Европейском Северо-Востоке России

Table 2. Granulometric composition of the Pechora moraine in the European North-East of Russia

Долины рек River valleys	Карбонат- ность, % Carbonate content, %	Содержание фракций, %, размер, мм Content of fractions, %, size, mm				Средний диаметр, d_{cp} , мм Average diameter, d_{cp} , mm	Коэффициент сортировки, S_c Sorting coefficient, S_c
		>1.0	1.0–0.1	0.1–0.01	<0.01		
Черная / Chernaya	6.0	1.8	20.7	22.4	55.1	0.009	0.20
Лая / Laya	3.0	0.5	25.8	37.4	36.4	0.019	0.16
Шапкина / Sharpkina	5.58	1.7	16.6	37.6	44.1	0.013	0.18
нижняя Печора / Lower Pechora	3.64	1.8	28.5	36.3	33.4	0.025	0.14
Колва / Kolva	6.06	1.1	9	37.4	52.5	0.008	0.21
Ижма / Izhma	7.44	1.1	25.7	35.2	38	0.019	0.18
Междуречье Мезени и Вашки (Удора) Interfluve of Mezen and Vashka (Udora)	7.70	2.9	60.2	23.5	13.4	0.070	0.19
Вычегда / Vychegda	6.53	1.9	35.1	30.9	32.1	0.029	0.14
Адзэва / Adzva	2.85	0.8	22.8	32.8	43.7	0.014	0.16
Сейда / Seyda	12.68	11.5	22.8	38.4	27.3	0.038	0.10
средняя Печора Middle Pechora	2.82	1.8	35.4	35.2	27.7	0.035	0.14



Но в целом, без учета структуры печорской морены на Удоре, в гранулометрическом составе этой морены (табл. 3, рис. 3) наиболее высоко содержание глинистой фракции, что определяет ее самый тонкий на территории Европейского Северо-Востока России средний диаметр зерен ($d_{cp} = 0.016$ мм).

В бассейне р. Вычегды (**зона В**) четвертичные отложения залегают на песчаниках и гравелитах перми, триаса и юры и перекрывающая их печорская морена имеет довольно грубый гранулометрический состав. Представлена она валунной супесью со средним диаметром зерен, равным 0.029 мм, что обусловлено высоким суммарным содержанием гравия и песка (до 37 %) в составе мелкозема.

В **зоне С**, включающей крайний северо-восток Тимано-Печоро-Вычегодского региона, в береговых обнажениях рек Адзвы, Бол. Роговая и Сейды — северных притоков р. Усы — образования квартера лежат на фанерозойских породах различной структуры и степени литификации. Подстилающие породы сложены мезозойскими песчаниками, алевролитами и аргиллитами, а также серыми и желтовато-серыми известняками (часто окремнелыми, иногда пиритизированными), известково-кремнистыми и глинистыми

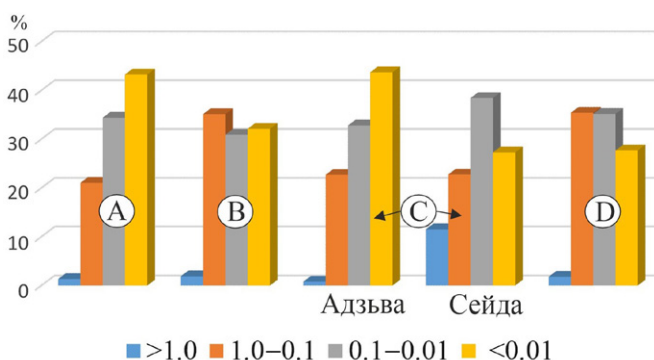


Рис. 3. Гранулометрический состав печорской морены в территориальных зонах Европейского Северо-Востока России. А, В, С и D — территориальные зоны

Fig. 3. Granulometric composition of the Pechora moraine in the territorial zones of the European North-East of Russia. A, B, C and D — territorial zones

сланцами, мергелями, слагающими гряды Чернышева. В долинах рек Бол. Роговая и Сейды отложения неоплейстоцена залегают на грубозернистых известковых песчаниках и гравелитах нижней перми, а также на верхнепермских углисто-глинисто-кремнистых сланцах.

В бассейне р. Адзвы печорская морена выступает лишь на нижнем 80-километровом отрезке реки, слагая основания береговых обнажений. Она отличается довольно высокой глинистостью: содержание фракции менее 0.01 мм составляет 43.7 %, алевроитовой — 32.8 %, гравийно-песчаной — 23.5 %. Повышенная глинистость морены и темная, почти черная ее окраска обусловлены активной ассимиляцией печорским ледником верхнеюрских (келловейских) черных глин, подстилающих четвертичные отложения в нижнем течении р. Адзвы. Но высокое содержание глины в составе печорской морены может указывать и на формирование ее в значительной степени за счет пород близкого транзита — песчано-глинистых образований мезозоя, широко развитых на территории Большеземельской тундры. В долине р. Сейды печорская морена имеет наиболее грубый в регионе гранулометрический состав и сложена весьма плотной несортированной супесью ($S_c = 0.10$, $d_{cp} = 0.038$ мм). Повышенная плотность морены, вероятно, связана с ее аномально высокой суммарной карбонатностью — 12.68 %. Соотношения размерных фракций практически не меняются в пределах горизонта: среднее содержание песка составляет 22.8 %, алевроита — 38.4 %, глины — 27.3 %. При этом содержание обломков гравийно-мелкогалечной размерности высоко — 11.5 %.

В **зоне D** (долина меридионального отрезка средней Печоры) неоплейстоценовые отложения подстилаются преимущественно пермо-триасовыми терригенными образованиями: крупно- и грубозернистыми песчаниками с прослоями и линзами конгломератов и гравелитов при резко подчиненном значении глинисто-алевритовых пород.

Печорская морена, как и на Сейде, имеет грубозернистый гранулометрический состав ($d_{cp} = 0.036$ мм) и представлена слабосортированной ($S_c = 0.14$) валунной супесью, что указывает на четко выраженную связь морены с породами субстрата. В нижнем течении сред-

Таблица 3. Гранулометрический состав печорской морены в территориальных зонах Северо-Востока Европейской России

Table 3. Granulometric composition of the Pechora moraine in the territorial zones of the North-East European Russia

Территориальная зона Territorial zone	Карбонатность, % Carbonate content, %	Содержание фракций, %, размер, мм Content of fractions, %, size, mm				Средний диаметр, d_{cp} , мм Average diameter, d_{cp} , mm	Коэффициент сортировки, S_c Sorting coefficient, S_c
		>1.0	1.0–0.1	0.1–0.01	<0.01		
A	5.29	1.3	21.1	34.4	43.3	0.016	0.18
B	6.53	1.9	35.1	30.9	32.1	0.029	0.14
C	Долина Адзвы Adzva valley	2.85	0.8	22.7	32.8	0.014	0.16
	Долина Сейды Seyda valley	12.68	11.5	22.8	38.4	0.038	0.10
D	2.82	1.8	35.4	35.2	27.7	0.036	0.14

ней Печоры отложения неоплейстоцена залегают на песчаниках и алевролитах средней юры, и здесь (в обнажениях у сел Акись и Родионово) d_{cp} мелкозема морены составляет 0.030 мм. В южном направлении, в верхнем течении средней Печоры, где четвертичные осадки лежат на более крупнозернистых пермо-триасовых песчаниках, d_{cp} печорской морены закономерно возрастает до 0.046 мм.

Изучение закономерностей образования вещественного состава морен, формирующегося в процессе экзарационно-аккумулятивной деятельности ледника, предполагает обязательное исследование их минерального состава, также обусловленного влиянием пород, слагающих удаленные, транзитные и местные питающие ледниковые провинции. При усилении экзарационной активности материкового льда местные подстилающие породы оказывали на формирование состава основных морен, включая минеральный, определяющее воздействие. Нами изучалась тяжелая фракция морен, поскольку она является многокомпонентной и наиболее чутко реагирующей на изменения минерального состава подстилающих пород и отложений близкого транзита. Минеральные спектры разновозрастных морен образовались за счет материала северо-восточной (Пай-Хой-Уральско-Новоземельской) и северо-западной (Фенноскандинавской) удаленных областей питания. Тяжелая фракция терригенных и карбонатных палеозойских осадочных пород северо-восточной питающей провинции характеризуется высокой концентрацией эпидота и в значительных количествах содержит рудные минералы, гранаты, циркон, рутил, турмалин, сидерит, флюорит. В минеральном спектре магматического комплекса Уральской области сноса высоки содержания рудных минералов, пироксенов, амфиболов, гранатов, циркона, рутила, турмалина, сфена (Батурин, 1947; Рябченков, 1965; Фишман, 1968). Для Фенноскандинавской питающей ледниковой провинции характерен широкий спектр тяжелых

минералов, основными из которых являются амфиболы, гранаты, рудные, циркон, лейкоксен и другие титановые минералы, эпидот; реже — апатит, монацит, ставролит, силлиманит, кианит, щелочные амфиболы (Кочетков, 1967). Что касается особенностей минерального состава тяжелой фракции пород транзитных и местных питающих провинций, то подробный обзор их литологического состава приведен в нашей ранней работе (Андреичева, 1994). Минеральный состав печорской морены в территориальных зонах А, В, С и D приведен в табл. 4 и представлен на рис. 4.

Таблица 4. Минеральный состав печорской морены в территориальных зонах Европейского Северо-Востока России

Table 4. Mineral composition of the Pechora Moraine in the territorial zones of the European North-East of Russia

Минералы Minerals	Зоны Zones	A	B	C	D
ильменит / ilmenite		5.8	7.1	8	7.3
эпидот / epidote		22.7	23.7	26.7	32.5
амфибол / amphibole		8.4	12.9	7	9.3
гранат / garnet		15.6	17.7	9.5	14.2
пирит / pyrite		11.2	8.8	16.7	5.8
сидерит / siderite		16.3	9.3	16.3	16.6
Группа титановых минералов Titanium minerals group		6.5	5.7	6.6	6
Группа метаморфических минералов Metamorphic minerals group		3.1	6.2	2.1	2.7

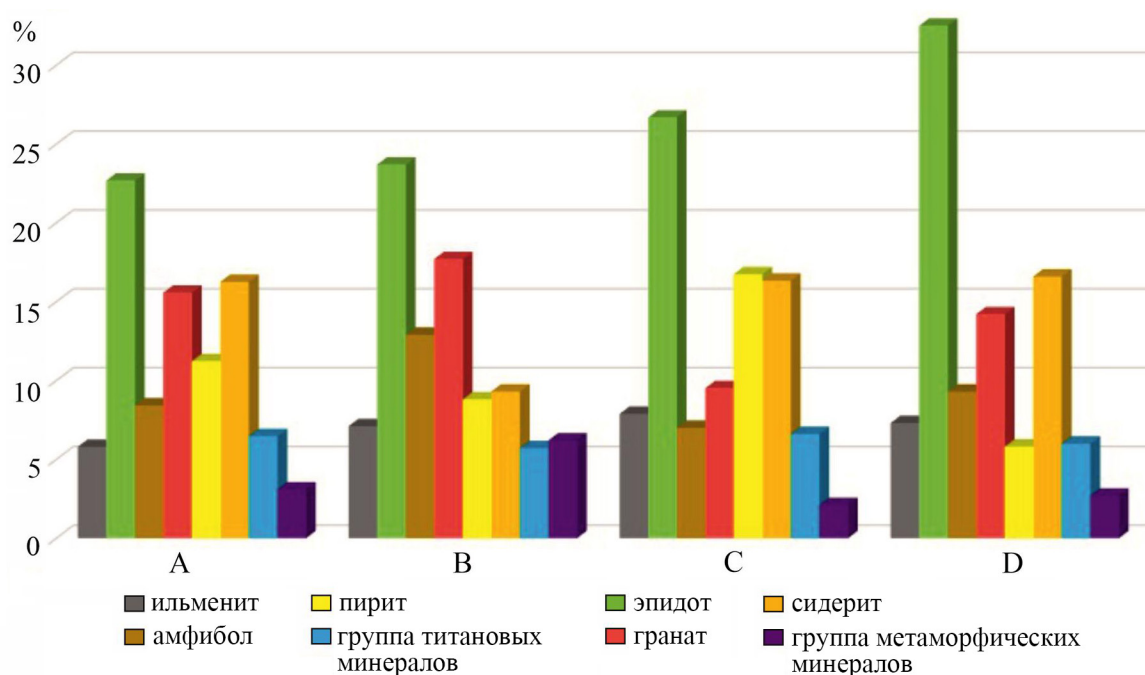


Рис. 4. Минеральный состав печорской морены в территориальных зонах Европейского Северо-Востока России

Fig. 4. Mineral composition of the Pechora moraine in the territorial zones of the European North-East of Russia



В зоне А печорская морена характеризуется амфибол (8 %)-пирит (11 %)-сидерит (16 %)-гранат (16 %)-эпидотовой (23 %) ассоциацией тяжелых минералов, ильменита содержится 6 %. Группа титановых минералов (рутил, титанит, лейкоксен) составляет 6 %, метаморфических (кианит, ставролит, силлиманит) — 3 %. Во всех разрезах печорской морены сидерита больше, чем пирита. В легкой фракции морены значительно содержание глауконита, характерного минерала подстилающих четвертичные отложения пород триаса, мела и юры — до 60 зерен на стандартный петрографический шлиф.

В зоне В минеральный спектр тяжелой фракции печорской морены аналогичен таковому в зоне А. Отличия состоят лишь в более низком суммарном содержании пирита и сидерита при их равном соотношении, а также более высокой концентрации минералов метаморфической группы.

В зоне С тяжелые минералы образуют гранат (10 %)-сидерит (16 %)-пирит (17 %)-эпидотовую (27 %) минеральную ассоциацию с почти равными содержаниями амфиболов и ильменита, соответственно составляющих 7 % и 8 %. Это может быть связано с ассимиляцией печорским ледником местных подстилающих юрских пород, а также развитых северо-восточнее, на пути его следования, триасовых гравийно-песчаных отложений. В тяжелой фракции и тех, и других пород преобладают минералы группы эпидота-цоизита, довольно обычны значительные содержания пирита и сидерита. Группа титановых минералов составляет 7 %, метаморфических — лишь 2 %.

В зоне D ассоциация тяжелых минералов печорской морены обогащена эпидотом, среднее содержание которого достигает 37 %, что связано с влиянием местных питающих провинций, представленных породами триаса, содержащими, как известно, до 60 % эпидота (Чалышев, Варюхина, 1968). Гранаты составляют 13 %, сидерит — 19 %, доли амфиболов, ильменита и пирита понижены, в среднем на каждый из них приходится соответственно 6, 8 и 5 %. Суммарное содержание титановых минералов невысоко — 6 %, еще меньше количество минералов метаморфической группы — 2 % (рис. 4).

Петрографический состав обломков пород из печорской морены всей территории Европейского Северо-Востока России представлен в табл. 5 и на рис. 5. **В зоне А** весьма существенно содержание местных подстилающих мезозойских песчаников и алевролитов, которые в зоне В (долина р. Вычегды) являются транзитными породами. В зоне А почти треть всех обломков в морене представлена местными породами. Обломки нижнепалеозойских известняков и доломитов составляют до 40 %, при этом темноокрашенные карбонатные породы и их светлоокрашенные разновидности содержатся в равных количествах. Постоянно отмечаются единичные обломки розовых мраморовидных криноидно-мшанковых известняков ордовик-раннесилурийского возраста, которые характерны для печорской морены и бассейна р. Вычегды. В коренном залегании подобные известняки в пределах Тимано-Уральской области неизвестны, поэтому их присутствие однозначно свидетельствует о связи этой морены с Новоземельской питающей провинцией и позволяет нам квалифицировать эти породы как руководя-

щие валуны (Кристаллические руководящие..., 1971). Их наличие в моренах Европейского Северо-Востока России предыдущими исследователями не отмечалось. Содержание дальнепринесенных обломков кристаллических образований, кварцитов и кварцитопесчаников составляет 15 %. Количество песчаников перми и триаса и (в меньшей степени) кремнистых пород невелико — 12 %. Но эти породы, участвуя в геологическом строении Печорской гряды, которая простирается параллельно Тиману и пересекает р. Печоры у с. Мутный Материк, для долины р. Печора не являются столь уж дальнепринесенными. Удлиненные обломки пород в морене ориентированы с севера-северо-востока в секторе 0–45°.

В зоне В удлиненные обломки пород в печорской морене ориентированы по азимуту 200–240°, что указывает на поступление обломочного материала с северо-востока. Как и в зоне А, в составе обломков здесь отмечаются новоземельские розовые криноидно-мшанковые известняки. Преобладают чуждые этой зоне породы: известняки (преимущественно темноокрашенные), палеозойские мергели и доломиты, кремне-известняки, содержание которых достигает 34 %. Количество обломков юрских и меловых песчаников и алевролитов составляет 32 %, магматических и метаморфических пород дальнего сноса меньше — 22 %, в еще меньшем количестве (лишь 12 %) содержатся обломки терригенных пород верхней перми и триаса.

В печорской морене **зоны С** обломки местных светло-серых и белых известняков девона и карбона с гряды Чернышева доминируют, составляя 29 %. На крепкие зеленовато-серые и серые песчаники, гравелиты и конгломераты перми и триаса приходится 17 %. Эти породы можно считать как местными, так и близкого транзита, поскольку пермские образования практически повсеместно подстилают здесь отложения неоплейстоцена. Характерно также довольно высокое содержание (20 %) магматических и метаморфических пород Пай-Хоя и Полярного Урала и постоянное присутствие единичных обломков новоземельских розовых криноидно-мшанковых известняков. В качестве еще одной особенности печорской морены необходимо отметить выдержанную на большей части изученной территории ориентировку длинных осей обломков в секторе 340–60°.

В зоне D (долина средней Печоры) в этой морене также преобладают карбонатные породы, составляющие около 38 %. Половина обломков (19 %) представлена нижнепалеозойскими темно-серыми и черными, иногда битуминозными известняками и доломитами. Мезозойские песчаники, алевролиты и аргиллиты содержатся в количестве 27 %. Подстилающие перм-триасовые осадочные образования и кремнистые породы составляют лишь 11 %, тогда как экзотические для средней Печоры магматические и метаморфизованные породы, а также кварциты и кварцитопесчаники — 24 %. Длинные оси обломков пород ориентированы с севера-северо-востока по азимуту 180–220°.

Таким образом, печорская морена в пределах выделенных территориальных зон формировалась за счет материала Пай-Хой-Уральско-Новоземельского центра оледенения, на что указывает комплекс ее литологических признаков, включая петрографические (табл. 5, рис. 5).

**Таблица 5.** Петрографические критерии расчленения и корреляции среднелепесточных морен в территориальных зонах Северо-Востока Европейской России**Table 5.** Petrographic criteria for the subdivision and correlation of Neopleistocene moraines in the territorial zones of the North-East of European of Russia

Территориальные зоны ¹ Territorial zones	Горизонты ² Horizons	Петрографический состав, % Группы пород ³ Petrographic content, % Rock groups						Руководящие валуны, другие характерные породы Leading boulders, other characteristic rocks	Ориентировка обломков пород Orientation of rock debris
		I	II	III	IV	V	IV		
А	Q _{II4} pč	20	20	33	12	5	10	розовые криноидно-мшанковые известняки с Новой Земли; преобладают темноокрашенные известняки и местные мезозойские породы pink crinoid-mshant limestones from the New Earth. Dark-colored limestones and local Mesozoic rocks prevail	CCB 0–45°
	Q _{II6} vč	15	25	22	15	12	11	изверженные породы Фенноскандинавии, тиманские базальты с агатами, опоки, мергели, оранжевые песчаники перми; доминируют светло-серые и белые известняки Fennoscandian pyrogenic rocks, Timan basalt with agates, opokas, marls, Permian orange sandstones. The light gray and white limestones dominate	3C3 310–330°
В	Q _{II4} pč	23	11	32	12	9	13	новоземельские розовые криноидно-мшанковые известняки Novozemelsky pink crinoid-bryozoan limestones	CCB 200–240°
	Q _{II6} vč	12	35	19	12	14	8	кристаллические породы Фенноскандинавии, Тиманские базальты с агатами Fennoscandian crystalline rocks, Timan basalt with agates	3C3 285–330°
С	Q _{II4} pč	11	29	23	17	7	13	новоземельские розовые криноидно-мшанковые известняки; доминируют местные светлоокрашенные известняки карбона Novozemelsky pink crinoid-bryozoan limestones. Local light painted Carboniferous limestones dominate	CC3–BCB 340–60°
	Q _{II6} vč	15	13	19	22	15	16	породы Полярного и Приполярного Урала: пироксениты, амфиболиты, перидотиты, кварциты и кварцитопесчаники ордовика и девона rocks of the Polar and Subpolar Urals: pyroxenites, amphibolites, peridotites, Ordovician and Devonian quartzites and quartzite sandstones	BCB–BIOB 45–105°



Окончание таблицы 5

Территориальные зоны ¹ Territorial zones	Горизонты ² Horizons	Петрографический состав, % Группы пород ³ Petrographic content, % Rock groups						Руководящие валуны, другие характерные породы Leading boulders, other characteristic rocks	Ориентировка обломков пород Orientation of rock debris
		I	II	III	IV	V	VI		
D	Q _{II4} рч	19	19	27	11	9	15	новоземельские розовые криноидно-мшанковые известняки; доминируют местные светлоокрашенные карбонатные породы Novozemelsky pink crinoid-bryozoan limestones. Local light-colored carbonate rocks dominate	CCB 0–40°
	Q _{II6} вч	13	15	24	21	13	14	породы Полярного и Приполярного Урала: амфиболиты, пироксениты, перидотиты, кварциты и кварцитопесчаники ордовика и девона rocks of the Polar and Subpolar Urals: amphibolytes, pyroxenites, peridotites, Ordovician and Devonian quartzites and quartzite sandstones	CCB 40–60°

¹ Территориальные зоны. Долины рек: А — Черной, Шапкиной, Лаи, нижней Печоры; Колвы, Ижмы, Удоры; В — Вычегды; С — Адзвы, Сейды, Бол. Роговая; D — средней Печоры.
Territorial zones. Valleys of rivers: A — Chernaya, Shapkina, Laya, lower Pechora; Kolva, Izhma, Udora; B — Vychegda; C — Adz'va, Seyda, Bol. Rogovaya; D — middle Pechora.

² Горизонты: Q_{II4} рч — печорский (днепровский), Q_{II6} вч — вычегодский (московский).
Horizons: Q_{II4} рч — Pechora (Dnieper), Q_{II6} вч — Vychegda (Moscow).

³ Группы пород: I — палеозойские темно-серые и черные известняки и доломиты, II — палеозойские светло-серые и белые известняки, III — юрские и нижнемеловые терригенные породы, IV — терригенные породы перми и триаса, V — магматические и метаморфические породы (дальнеприносные), VI — кварциты и кварцитопесчаники.
Rock groups: I — Paleozoic dark gray and black limestones and dolomites, II — Paleozoic light gray and white limestones, III — Jurassic and Lower Cretaceous terrigenous rocks, IV — Permian and Triassic terrigenous rocks, V — igneous and metamorphic rocks (long-distance), VI — quartzites and quartzite sandstones.

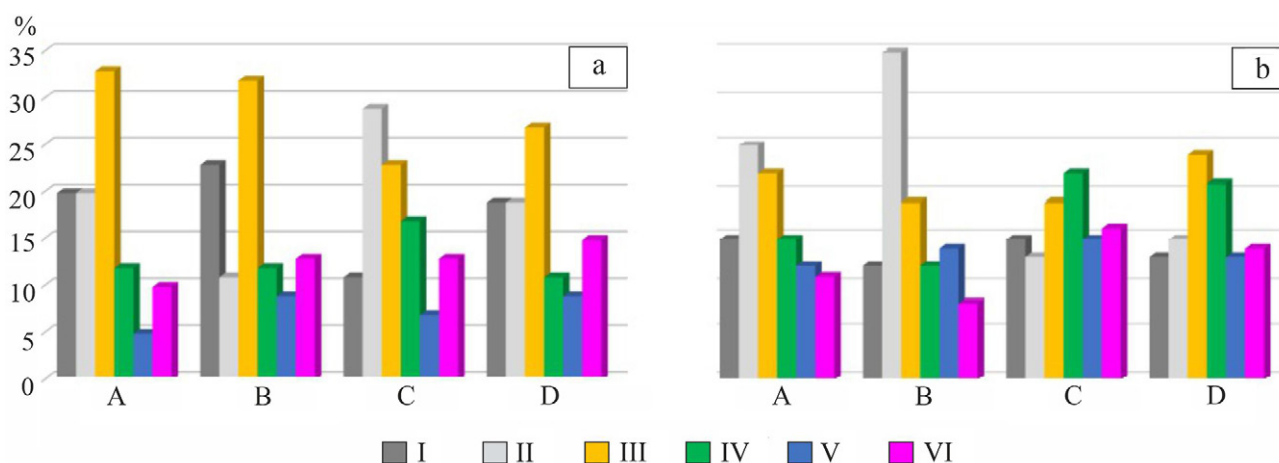


Рис. 5. Петрографический состав обломков пород из печорской (а) и вычегодской (б) морен в территориальных зонах А, В, С и D

Fig. 5. Petrographic composition of rock fragments from the Pechora (a) and Vychegda (b) moraines in territorial zones A, B, C and D

Вычегодская (московская) морена широко развита на территории Европейского Северо-Востока России, ею сложены средние и верхние части разрезов береговых обнажений. Часто с экзарационным контактом она перекрывает родионовские (шкловские) межледниковые отложения, иногда лежит непосредственно на печорской морене. Мощность вычегодской морены в береговых обнажениях колеблется от нескольких метров до 35 м.

В **зоне А** эта морена, по аналогии с печорской, также имеет самый тонкий гранулометрический состав. Она содержит весьма незначительную примесь гравия (1.5 %), но обогащена глиной, среднее количество которой составляет 37.7 %. Морена слабо сортирована ($S_c = 0.18$), средний диаметр зерен (d_{cp}) равен 0.020 мм (табл. 6)

В **зоне В** вычегодская морена характеризуется наиболее высоким в регионе содержанием материала, растворимого в 10 %-й соляной кислоте (HCl), — 8.90 %. Степень сортированности морены очень низкая ($S_c = 0.12$), сложена она валунным суглинком с близкими средними содержаниями гравийно-песчаной (32.4 %), алевритовой (31.8 %) и глинистой (35.8 %) фракций, представляя собой классическую поликомпонентную «оптимальную смесь», что является характерной особенностью отложений ледникового ряда.

В **зоне С** вычегодская морена имеет изменчивый гранулометрический состав. Особенно это характер-

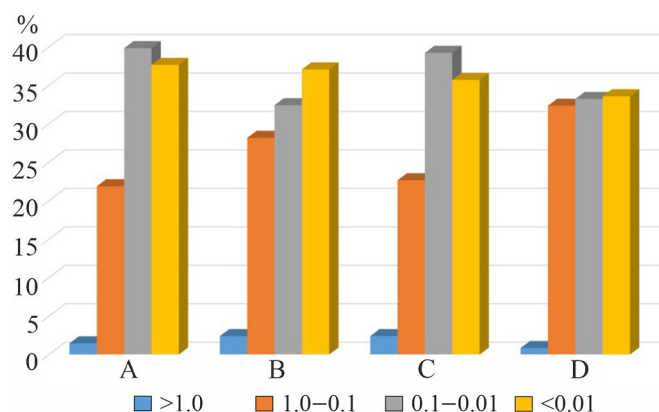


Рис. 6. Гранулометрический состав вычегодской морены в территориальных зонах Северо-Востока Европейской России

Fig. 6. Granulometric composition of the Vychegda moraine in the territorial zones of the North-East of European Russia

но для морены из разрезов береговых обнажений реки Бол. Роговая, где она представлена отложениями от супесей до тяжелых суглинков (d_{cp} варьирует в широких пределах — от 0.012 до 0.042 мм) с повышенной суммарной карбонатностью, достигающей здесь 7.90 % против 2.32 % на р. Адзьве. Вычегодская морена в долине р. Сейды имеет более тонкий средний диаметр ($d_{cp} = 0.021$ мм), чем печорская, и значительно более низкую суммарную карбонатность (6.91 %), вероятно обусловившую меньшую плотность породы. В целом же вычегодская морена представлена преимущественно валунными суглинками ($d_{cp} = 0.020$ –0.023 мм), и низкой степенью сортированности ($S_c = 0.10$ –0.16). Отмечается прямая корреляция между средним диаметром зерен и коэффициентом их сортировки.

В **зоне D** в разрезах средней Печоры структура вычегодской морены также меняется от разреза к разрезу, на что указывают довольно существенные колебания среднего диаметра зерен (от 0.010 до 0.044 мм) при среднем его значении 0.027 мм. Содержания гравийно-песчаной, алевритовой и глинистой фракций в морене примерно равны, их соотношение в процентах составляет соответственно 33.3:33.2:33.6 (рис. 6). Морена плохо сортирована ($S_c = 0.15$), суммарная карбонатность ее незначительна (от 1.40 до 3.40 %).

Широкое развитие вычегодской морены на рассматриваемой территории обеспечило высокую степень изученности ее минерального состава (табл. 7, рис. 7).

В **зоне А** тяжелая фракция представлена эпидотом (26 %), гранатами и амфиболами, составляющими соответственно 17 и 12 %. На пирит и сидерит в сумме приходится 19 % при преобладающей роли сидерита — 12 %. Ильменит составляет 6 %, количества титановых и метаморфных минералов соответствуют 5 и 4 %.

В **зоне В** в составе тяжелых минералов вычегодской морены резко доминируют амфиболы, составляющие 40 %, и гранаты — 23 %. Эпидот присутствует в количестве 15%, совсем незначительны содержания ильменита (3 %), по 3 и 5 % соответственно приходится на долю группы титановых и метаморфических минералов, мизерны содержания пирита и сидерита (по 1 %). Различия в минеральном составе печорской и вычегодской морен на территории зоны Б очевидны и выдержаны, что может свидетельствовать о важности изучения тяжелых минералов с целью стратиграфических и палеогеографических реконструкций.

Таблица 6. Гранулометрический состав вычегодской морены в территориальных зонах Северо-Востока Европейской России

Table 6. Granulometric composition of the Vychegda moraine in the territorial zones of the European North-East of Russia

Территориальная зона Territorial zone	Карбонатность, % Carbonate content, %	Содержание фракций, %, размер, мм Content of fractions, %, size, mm				Средний диаметр, d_{cp} , мм Average diameter, d_{cp} , mm	Коэффициент сортировки, S_c Sorting coefficient, S_c
		>1.0	1.0-0.1	0.1-0.01	<0,01		
A	4.75	1.5	21.9	39.8	37.7	0.020	0.18
B	8.90	2.4	28.2	32.4	37.1	0.024	0.12
C	5.71	2.4	22.7	39.2	35.7	0.021	0.12
D	2.58	0.9	32.4	33.2	33.6	0.027	0.15

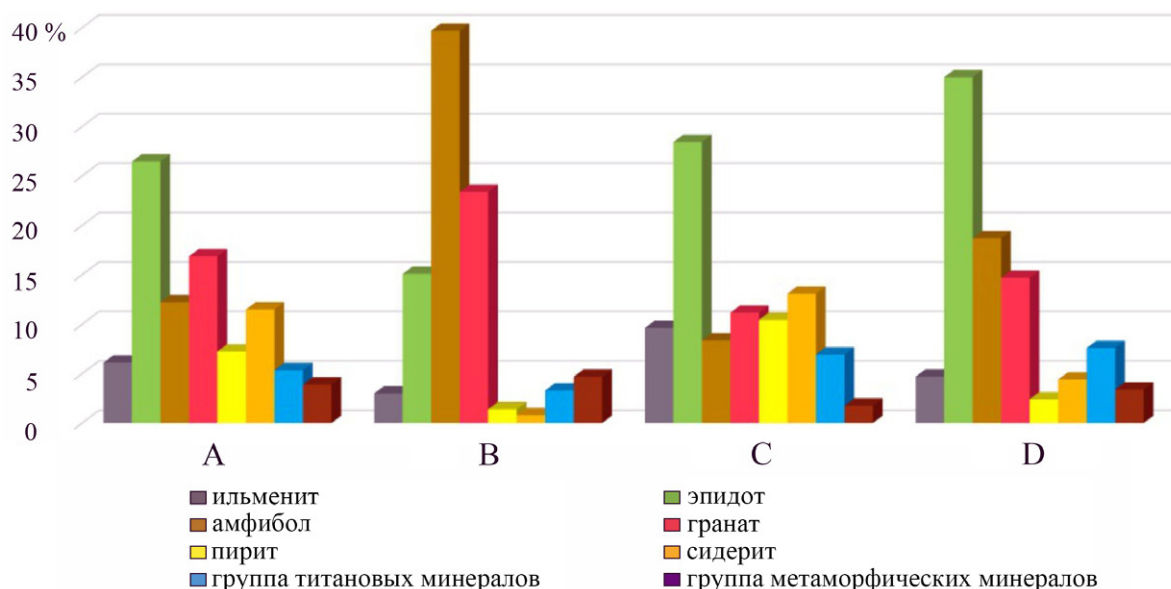


Рис. 7. Минеральный состав вычегодской морены в территориальных зонах Европейского Северо-Востока России (%)

Fig. 7. Mineral composition of the Vychegda moraine in the territorial zones of the European North-East of Russia (%)

Таблица 7. Минеральный состав вычегодской морены в территориальных зонах Европейского Северо-Востока России

Fig. 7. Mineral composition of the Vychegda moraine in the territorial zones of the European North-East of Russia

Зоны Zones	A	B	C	D
Минералы Minerals				
ильменит / ilmenite	6	3	10	5
эпидот / epidote	26	15	28	35
амфибол / amphibole	12	40	8	19
гранат / garnet	17	23	11	15
пирит / pyrite	7	1	10	2
сидерит / siderite	12	1	13	4
группа титановых минералов titanium minerals group	5	3	7	8
группа метаморфических минералов metamorphic minerals group	4	5	2	3

В зоне С тяжелая фракция слагает амфибол (8 %)-ильменит (10 %)-пирит (10 %)-гранат (11 %)-сидерит (13 %)-эпидотовую (28 %) минеральную ассоциацию с содержаниями титановых и метаморфических минералов 7 и 2 % соответственно.

В зоне D в ассоциации тяжелых минералов вычегодской морены (по аналогии с печорской этого района) также высоко содержание эпидота, составляющего 35 % веса тяжелой фракции, что, скорее всего, связано с выходами на поверхность пород триаса, обогащенных эпидотом. Суммарное количество амфиболов и гранатов составляет 34 %, что может указывать на участие в формировании вычегодской морены метаморфизованных гранатосодержащих и зеленокаменных пород Приполярного Урала. Содержание титано-

вых минералов существенно — 8 %, группы метаморфических минералов — лишь 3 %.

На большей части Европейского Северо-Востока России (зоны А и В) вычегодская морена формировалась за счет поступления материала из Северо-Западной терригенно-минералогической провинции. А на крайнем северо-востоке и востоке региона (зоны С и D) ее образование следует связывать с Полярным и Приполярным Уралом (Кузнецова, 1971; Андреичева, 1992). В зонах А и В основу минералогического спектра вычегодской морены составляют руководящие минералы Фенноскандинавии и Северного Тимана — амфиболы и гранаты. Суммарное количество пирита и сидерита в вычегодской морене ниже, чем в печорской. Глауконит же в ней имеет более мелкую размерность, и его содержания его в 3–4 раза меньше, чем в печорской морене (в стандартном петрографическом шлифе не более 15–20 зерен). На крайнем северо-востоке региона (зона С) и на средней Печоре (зона D) в вычегодской морене повышены содержания эпидота, амфиболов и гранатов, что, вероятно, обусловлено их поступлением из уральских зеленокаменных и метаморфизованных гранатосодержащих пород.

Установленные возрастные и пространственные тенденции закономерной изменчивости минерального состава разновозрастных горизонтов морен с учетом других литологических данных позволили достоверно выявить их стратиграфическую принадлежность.

В зоне А вычегодская морена по петрографическому составу грубообломочного материала и по его ориентировке существенно отличается от печорской (табл. 5, рис. 5). Она содержит значительно больше обломочного материала, и более крупного размера, чем печорская. Руководящие обломки в долинах рек Большеземельской тундры, нижней Печоры и Ижмы представлены породами, которые можно рассматривать в качестве пород-индикаторов Северо-Западной терригенно-минералогической провинции: это граниты (в том числе рапакиви), гранитогайсы, габброиды и их метаморфизованные разновидности, нефелиновые сиениты, аметисты и агатсодержащие базальты с

Северного Тимана. В долине Шапкиной содержание базальтов с агатами иногда достигает 24–26 %. В целом же концентрация дальнепринесенных изверженных пород в морене меняется от 14 до 28 %. В группе обломков карбонатных пород, среднее содержание которых составляет 40 %, доминируют светло-серые и белые известняки (25 %). Местные юрские и нижнемеловые породы содержатся в количестве 20–24 %, чуждые для зоны А кремнистые породы и пермо-триасовые осадочные образования составляют 11–16 %. Полученная нами калий-аргоновая датировка валуна гранитогнейса из вычегодской морены в долине р. Лаи, равная 1775 млн лет, указывает на формирование ее за счет фенноскандинавского материала (Андреичева, Андреичев, 2013). Ориентировка обломков в секторе 310–330° также свидетельствует о сносе материала с запада-северо-запада при формировании вычегодской морены в этой зоне.

В зоне В (долина р. Вычегды) в петрографическом составе крупнообломочного материала тоже высоко содержание кристаллических пород фенноскандинавского происхождения, составляющих в отдельных разрезах вычегодской морены до 29 %. Наряду с гранитами, гранитогнейсами, гранатовыми амфиболитами, долеритами, диоритами и габбро встречаются валуны крупнокристаллических нефелиновых сиенитов. На поступление терригенного материала из Фенноскандинавского центра оледенения указывает как ориентировка обломков пород с запада-северо-запада на восток-юго-восток в секторе 285–330°, так и калий-аргоновые датировки валунов кристаллических пород (гранитов, диоритов, гнейсов, сланцев) из вычегодской морены — 1345–2015 млн лет, что хорошо согласуется с реконструкцией направления движения ледникового покрова во время второго среднеледникового оледенения (Андреичева, Андреичев, 2013). Карбонатные породы, являющиеся как транзитными, так и дальнепринесенными, преобладают, составляя до 47 % от числа всех обломков. Большая часть их (35 %) приходится на долю светлоокрашенных известняков. В этом моренном горизонте в небольшом количестве содержатся обломки пород нижней перми и карбона, развитые в бассейне Северной Двины: сероцветные мергели, доломиты, известняки, а также серые, реже красноцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты, тяжелая фракция которых обогащена гранатами (Кочетков, 1962).

Крайний северо-восток региона (**зона С**) территориально включает бассейны рек Адзвы, Бол. Роговая и Сейды. Петрографический состав обломков пород в вычегодской морене здесь разнообразен. Это вероятно, связано, с одной стороны, с локальными изменениями направления движения покровного ледника, перерабатывающего на своем пути породы различного петрографического состава, с другой — с различной степенью экзарации ледникового ложа, обусловленной динамической активностью ледника. По этой причине характеристика состава крупнообломочного материала рассмотрена отдельно в каждой речной долине.

В вычегодской морене р. Адзвы карбонатные породы составляют 28 %. На долю светлоокрашенных известняков, подобных слагающим гряды Чернышева, приходится 15 %. Содержания других пород в долине

реки изменчиво. В ее верховье в морене много обломков мезозойских пород, составляющих в среднем 29 %, а в ее нижнем течении их в три раза меньше — 9 %. Пермские и триасовые породы в верхнем течении реки содержатся в количестве 26 %, в низовье их немного больше — 29 %. На севере долины р. Адзвы обломки пород Полярного и Приполярного Урала — зеленые лавобрекчии, кварц-эпидотовые породы, габбродолериты, амфиболиты, перидотиты, пироксениты, различные сланцы (в том числе филлиты), фиолетовые и розовые кварциты и кварцитопесчаники девона и тельпосской свиты нижнего ордовика — составляют 18 %. В нижнем течении их количество возрастает до 45 %. Субширотная ориентировка удлиненных обломков пород в секторе 80–105° свидетельствует о формировании вычегодской морены в долине р. Адзвы за счет обломочного материала, представленного метаморфизованными свитами Полярного и Приполярного Урала.

В вычегодской морене р. Сейды, как и в разрезах р. Адзвы, содержание карбонатных пород также невысоко — 26 %, всего 11 % составляют светлоокрашенные разности известняков. На долю пермских и триасовых терригенных образований приходится 23 %, кристаллических пород с Урала — 28 %. Ориентировка удлиненных обломков пород с северо-востока на юго-запад в секторе 40–60° подтверждает связь вычегодской морены с Уральской питающей ледниковой провинцией.

Вычегодская морена в разрезах р. Бол. Роговая содержит 40 % обломков карбонатных пород, то есть их содержится существенно больше, чем на реках Адзвы и Сейде. Соотношения темных и светлых известняков различны. Редко преобладают светло-серые и белые известняки, иногда группа темноокрашенных карбонатных пород доминирует, либо количества обеих групп практически равны. Местные породы здесь сложены пермскими полимиктовыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами и песчаниками горчичной окраски, суммарное количество которых составляет только 9 %. Довольно высока концентрация обломков кристаллических пород Урала, аналогичных содержащимся в вычегодской морене долины р. Адзвы, которые в сумме с кварцитами и кварцитопесчаниками здесь составляют 26 %. Удлиненные обломки пород ориентированы по азимуту 225–270°.

Резюмируя результаты изучения петрографического состава крупнообломочного материала, заключенного в вычегодской морене зоны В, необходимо отметить его общность, сводящуюся к одинаковому набору петрографических групп обломков и их близкому процентному содержанию, а также ориентировку обломков пород в направлении, близком к субширотному. Так, вычегодская морена характеризуется постоянным присутствием магматических и метаморфических пород Урала, чуждых бассейнам этих рек, но составляющих 26–28 %. Ориентировка удлиненных обломков с востока-северо-востока по азимуту 220–285° также свидетельствует о влиянии Полярного и Приполярного Урала на образование этой морены.

В зоне D на средней Печоре вычегодская морена тоже содержит относительно немного обломков карбонатных пород (28 %) с примерно равными соотношениями в этой группе темноокрашенных и светло-



окрашенных разностей известняков. Количество обломков юрских и меловых пород составляет 24 %. В составе крупнообломочного материала доминируют обломки экзотических для района пород — 48 %. Эта группа включает осадочные, преимущественно кремнистые породы (21 %), а чуждые долине средней Печоры метаморфические и изверженные образования составляют 27 %. Среди последних отмечено большое количество пород осевой части Приполярного и Полярного Урала. Петрографический состав кристаллических пород аналогичен таковому в долине р. Адзвы. Обломки пород ориентированы в секторе 40–60°, что подтверждает поступление обломочного материала в вычегодскую морену со стороны Полярного и северной части Приполярного Урала.

Заключение

Впервые на Европейском Северо-Востоке России детально проанализированы геологические, палеогляциологические и палеогеоморфологические факторы гляциолитогеогенеза, дана оценка их влияния на формирование состава морен и составлена классификационная сетка к карте литорайонов. С учетом результатов комплексного литологического изучения морен по типу ледникового питания выполнено литолого-палеогеографическое районирование территории исследований с составлением карты литорайонов. Выделены 32 литорайона, представляющие собой элементарные единицы районирования, в пределах которых корреляция морен с использованием литологических параметров выполняется без ограничений в любом направлении. Составленную карту предлагается использовать в качестве основы при выполнении региональных и межрегиональных литологических сопоставлений морен. Часть выделенных литорайонов объединена в четыре территориальные зоны (А, В, С и D). Выявлены региональные литологические критерии расчленения морен среднего неоплейстоцена, позволяющие идентифицировать разновозрастные моренные горизонты и проводить их обоснованную корреляцию в выделенных территориальных зонах.

Для разработки литологических критериев расчленения и корреляции основных морен среднего неоплейстоцена на Европейском Северо-Востоке России проведен анализ результатов их многолетнего комплексного исследования. Обобщение данных гранулометрического анализа валунных суглинков, супесей и глин в выделенных территориальных зонах (более 6500 образцов) подтвердило низкую степень их сортировки и вывод о том, что их нужно рассматривать как отложения материковых ледниковых покровов неоплейстоцена.

В результате выполнения около 1500 минералогических анализов тяжелой фракции печорской и вычегодской морен по единой методике и обобщения полученных аналитических данных выявлена территориальная изменчивость состава тяжелой фракции не только разновозрастных, но и одновозрастных морен, обусловленная влиянием терригенного материала питающих ледниковых провинций трех категорий — удаленных, транзитных и местных — на формирование особенностей их минерального состава. Эти различия рекомендуется рассматривать в качестве диагностических признаков разновозрастности основных мо-

рен, как при стратиграфическом расчленении ледникового комплекса, так и при проведении пространственных корреляций ледниковых горизонтов.

Для установления местоположения питающих ледниковых провинций, направлений движения ледниковых покровов и путей переноса валунно-галечного материала изучен петрографический состав обломков пород в 900 валунных пробах из моренных горизонтов и замерена ориентировка заключенных в них удлиненных обломков (более 40 000 замеров).

На большом фактическом материале подтверждена эффективность использования для расчленения и корреляции морен данных петрографического состава крупнообломочного материала, соотношения дальнепринесенных и местных пород, наличия руководящих валунов. Наиболее перспективным и регионально выдержанным литостратиграфическим критерием является ориентировка удлиненных обломков пород.

Выявленные данные свидетельствуют о том, что печорская морена в пределах выделенных территориальных зон формировалась за счет материала Пай-Хой-Уральско-Новоземельского центра оледенения, на что четко указывает комплекс ее петрографических признаков (табл. 5).

Образование вычегодской морены в пределах территориальных зон А и В связано с Фенноскандинавией и Северным Тиманом. На поступление терригенного материала из Фенноскандинавского центра оледенения указывает как ориентировка обломков пород с запада-северо-запада на восток-юго-восток, так и изотопные датировки валунов кристаллических пород, содержащихся в горизонтах морен. Вычегодская морена в зонах С и D формировалась за счет материала Полярного и Приполярного Урала.

Установленные возрастные и пространственные тенденции закономерной изменчивости минерального состава разновозрастных горизонтов морен с учетом других литологических данных позволили достоверно выявить их стратиграфическую принадлежность.

Аргументированные выводы по расчленению и корреляции маркирующих среднеоплейстоценовых горизонтов морен, получившие комплексное обоснование, могут служить основанием для внесения уточнений в стратиграфическую схему среднего неоплейстоцена и проведения соответствующей корректировки региональных стратиграфических схем.

Исследования выполнены в рамках темы НИР «Эволюция биоты и среды ее обитания как основа расчленения и геологической корреляции осадочного чехла Печорской плиты и ее складчатого обрамления» ГР № 122040600008-5.

Литература / References

- Андреичева Л. Н. Основные морены европейского северо-востока России и их литостратиграфическое значение. СПб.: Наука, 1992. 125 с.
- Andreicheva L. N. The main moraines of the European North-East of Russia and their lithostratigraphic significance. St. Petersburg: Nauka, 1992, 125 p. (in Russian)
- Андреичева Л. Н. Питающие провинции и их влияние на формирование состава морен Тимано-Печоро-Вычегодского региона // Литология и полезные ископаемые. 1994. № 1. С. 127–131.

- Andreicheva L. N. Feeding provinces and their influence on the formation of the composition of moraines of the Timan-Pechora-Vychegda region. *Lithology and Mineral Resources*, 1994, No. 1, pp. 127–131. (in Russian)
- Андреичева Л. Н. Гранулометрический состав основных морен неоплейстоцена на крайнем северо-востоке Русской равнины // *Литология и полезные ископаемые*. 2023. № 6. С. 600–612. <https://doi.org/10.31857/S0024497X23700258>
- Andreicheva L. N. Grain size composition of Neopleistocene basal moraines in the Northeasternmost Area of the Russian Plain. *Lithology and Mineral Resources*, V. 58, 2023, No. 6, pp. 584–595. (in Russian)
- Андреичева Л. Н., Андреичев В. Л. К–Аг–изотопное датирование основных тиллов на северо-востоке Европы // VIII Всероссийское совещание по изучению четвертичного периода «Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований»: Сб. ст. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. С. 26–28.
- Andreicheva L. N., Andreichev V. L. K–Ar isotope dating of the main tills in northeastern Europe. The 8th All-Russian conference on the study of the Quaternary period «Fundamental problems of the Quaternary, results of the study and main directions of further research»: Collection of articles. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2013, pp. 26–28. (in Russian)
- Андреичева Л. Н., Марченко-Вагапова Т. И., Буравская М. Н., Голубева Ю. В. Природная среда неоплейстоцена и голоцена на Европейском Северо-Востоке России. М.: ГЕОС, 2015. 224 с.
- Andreicheva L. N., Marchenko-Vagarova T. I., Buravskaya M. N., Golubeva Yu. V. Natural environment of the Neopleistocene and Holocene of the European North-East of Russia. Moscow: GEOS, 2015, 224 p. (in Russian)
- Батурин В. П. Петрографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 338 с.
- Baturin V. P. Petrographic analysis of the geological past by terrigenous components. Moscow-Leningrad: Publishing house of the USSR AS, 1947, 338 p. (in Russian)
- Гайгалас А. И. Гляциоседиментационные циклы плейстоцена Литвы. Вильнюс: Мокслас, 1979. 95 с.
- Gaigalas A. I. Glaciodsedimentation cycles of the Pleistocene of Lithuania. Vilnius: Mokslas, 1979, 95 p. (in Russian)
- Кристаллические руководящие валуны Прибалтики / В. Вийдинг, А. Гайгалас, В. Гуделис, А. Раукас, Р. Тарвидас. Вильнюс: Минтис, 1971. 129 с.
- Crystalline guide boulders of the Baltics. V. Viiding, A. Gaigalas, V. Gudelis, A. Raukas, R. Tarvydas. Vilnius: Mintis, 1971, 129 p. (in Russian)
- Кочетков О. С. Акцессорные минералы в древних толщах Тимана и Канина. Л.: Наука, 1967. 120 с.
- Kochetkov O. S. Accessory minerals in ancient strata of Timan and Kanin. Leningrad: Nauka, 1967, 120 p. (in Russian)
- Кузнецова Л. А. Плейстоцен Печорского Приуралья. Казань, 1971. 122 с.
- Kuznetsova L. A. Pleistocene of the Pechora Urals. Kazan, 1971, 122 p. (in Russian)
- Минералогия, типоморфизм и генезис акцессорных минералов изверженных пород Севера Урала и Тимана / М. В. Фишман, Н. П. Юшкин, Б. А. Голдин, Е. П. Калинин. Л.: Наука, 1968. 250 п.
- Mineralogy, typomorphism and genesis of accessory minerals of eruptive rocks of the Northern Urals and Timan. M. V. Fishman, N. P. Yushkin, B. A. Goldin, E. P. Kalinin. Leningrad: Nauka, 1968, 250 p. (in Russian)
- Судакова Н. Г. Палеогеографические закономерности ледникового литогенеза. М.: Изд-во МГУ, 1990. 160 с.
- Sudakova N. G. Paleogeographical patterns of glacial lithogenesis. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1990, 160 p. (in Russian)
- Рухина Е. В. Литология ледниковых отложений. Л.: Недра, 1973. 176 с.
- Rukhina E. V. Lithology of glacial deposits. Leningrad, 1973, 176 p.
- Рябченков А. С. Региональная основа и аспекты изучения валунного и минерального состава четвертичных отложений Северо-Восточной области Русской платформы // Сборник статей по геологии и гидрогеологии. Вып. 4. М., 1965. С. 173–194.
- Ryabchenkov A. S. Regional basis and aspects of studying the boulder and mineral composition of Quaternary deposits of the North-Eastern region of the Russian platform. Collection of articles on geology and hydrogeology. Issue 4, Moscow, 1965, pp. 173–194. (in Russian)
- Чалышев В. И., Варюхина Л. М. Биостратиграфия верхней перми северо-востока европейской части СССР. Л.: Наука, 1968. 234 с.
- Chalyshev V. I., Varyukhina L. M. Biostratigraphy of the Upper Permian of the northeast of the European part of the USSR. Leningrad: Nauka, 1968, 234 p. (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 14.05.2025



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 552.543:551.72 (470.22)

DOI: 10.19110/geov.2025.6.4

Новый род строматолитов из палеопротерозоя Карельского кратона

А. В. Лютиков, П. В. Медведев

Институт геологии ФИЦ «Карельский НЦ РАН», Петрозаводск, Россия
andrew-greener@yandex.ru, pmedved@krc.karelia.ru

В статье приводятся результаты изучения нового рода строматолитов *Severinsaaria unica* gen. nov., обнаруженных на Карельском кратоне Фенноскандинавского щита в карбонатных породах разреза верхнего ятулия (палеопротерозой) юго-западного побережья озера Сегозеро (Центрально-Карельская строматолитовая провинция). Строматолиты были изучены различными методами, включая оптическую и электронную микроскопию, метод графического препарирования и 3D-визуализацию в программном обеспечении Blender. Проведено сравнение *Severinsaaria* gen. nov. с типичными столбчатыми строматолитами района изучения — *Djalmekella* и *Segosia*. Выделение нового рода *Severinsaaria* позволяет расширить знания о разнообразии палеопротерозойских строматолитовых построек на Карельском кратоне и дополнить палеонтологическую характеристику Центрально-Карельской строматолитовой провинции.

Ключевые слова: строматолиты, палеопротерозой, ятулий, Карельский кратон, Фенноскандинавский щит

A new genus of stromatolites from the Paleoproterozoic of the Karelian craton

A. V. Lyutikov, P. V. Medvedev

Institute of Geology FRC «Karelian RC RAS», Petrozavodsk, Russia

The article studies a new genus of stromatolites, *Severinsaaria unica* gen. nov., which was discovered on the Karelian craton of the Fennoscandian Shield. The stromatolites were found in carbonate rocks from the Upper Jatulian section of the Paleoproterozoic period, on the southwestern coast of Lake Segozero, in the Central Karelian stromatolite province. The study used various methods, such as optical and electron microscopy, graphic preparation, and 3D visualization using Blender software. *Severinsaaria* was compared with other columnar stromatolites from the study area, such as *Djalmekella* and *Segosia*, to identify its unique characteristics. The discovery of *Severinsaaria* allows expanding our knowledge of the diversity of Paleoproterozoic stromatolites on the Karelian craton, and better understanding the paleontological features of the Central Karelian province.

Keywords: stromatolites, Paleoproterozoic, Jatulian, Karelian craton, Fennoscandian Shield

Введение

Актуальность данной работы связана с вопросами изучения древнейших следов жизни на Земле, сохранившихся в виде строматолитов — слоистых донных микробных отложений (Riding, 2011). Они имеют самую продолжительную летопись в истории Земли (Riding, 1991) и доминируют среди фоссилий докембрийского возраста (McLoughlin et. al., 2013).

На Карельском кратоне Фенноскандинавского щита выделяются 4 строматолитовые провинции палеопротерозойского возраста: Северо-, Центрально-, Южно- и Восточно-Карельская (Макарихин и др., 2007), которые характеризуются уникальными сообществами строматолитов. Изученный разрез находится в Центрально-Карельской строматолитовой провинции в районе оз. Сегозеро (рис. 1).

Местонахождения строматолитов и их стратиграфическое распространение в разрезах на оз. Сегозеро были описаны исследователями в 80-х годах (Макарихин, Кононова, 1983; Сацук и др., 1988; Проблемы..., 1989). Один из наиболее богатых строматолитами разрез описан на острове Дюльмек, находящемся близ восточного берега оз. Сегозеро (рис. 1). В этом разрезе основными палеонтологическими объектами являются столбчатые строматолиты *Segosia impexa* Mak., *S. columnaris* Butin и *Djalmekella djalmekensis* Mak. (Макарихин, Кононова, 1983). Также выделяется местонахождение на о. Северинсаари со строматолитами *Omachtenia rhoda* Mak. et Medv (Макарихин, 1992).

В районе юго-западного берега оз. Сегозеро в ходе полевых работ 2023 года нами было обнаружено ра-

Для цитирования: Лютиков А. В., Медведев П. В. Новый род строматолитов из палеопротерозоя Карельского кратона // Вестник геонаук. 2025. 6(366). С. 39–48. DOI: 10.19110/geov.2025.6.4

For citation: Lyutikov A. V., Medvedev P. V. A new genus of stromatolites from the Paleoproterozoic of the Karelian craton. Vestnik of Geosciences, 2025, 6(366), pp. 39–48, doi: 10.19110/geov.2025.6.4

нее неизвестное местонахождение строматолитов (рис. 1). Изучение найденных строматолитовых построек показало, что они морфологически отличаются от ранее описанных здесь столбчатых строматолитов *Segosia*, *Djulmekella* и пластово-столбчатых *Omachtenia* (рис. 2). В настоящей статье приводятся результаты изучения недавней находки строматолитов, которые позволяют выделить новый род столбчатых построек, расширяющий палеонтологическую характеристику района оз. Сегозеро в Центрально-Карельской строматолитовой провинции.

Геологическое положение

Ондозерско-Сегозерская площадь в Центральной Карелии объединяет складчатые архейские зеленокаменные структуры лопийского надгоризонта, гранитогнейсовые и гранитоидные блоки и перекрывающие их узкие, вытянутые в северо-западном направлении протерозойские структуры, представленные отложениями сумийского, сариолийского и ятулийского надгоризонтов (Дмитриева, Кулешевич, 2018).

Протерозойские породы представлены андезибазальтами сумийского и олигомиктовыми гранитными

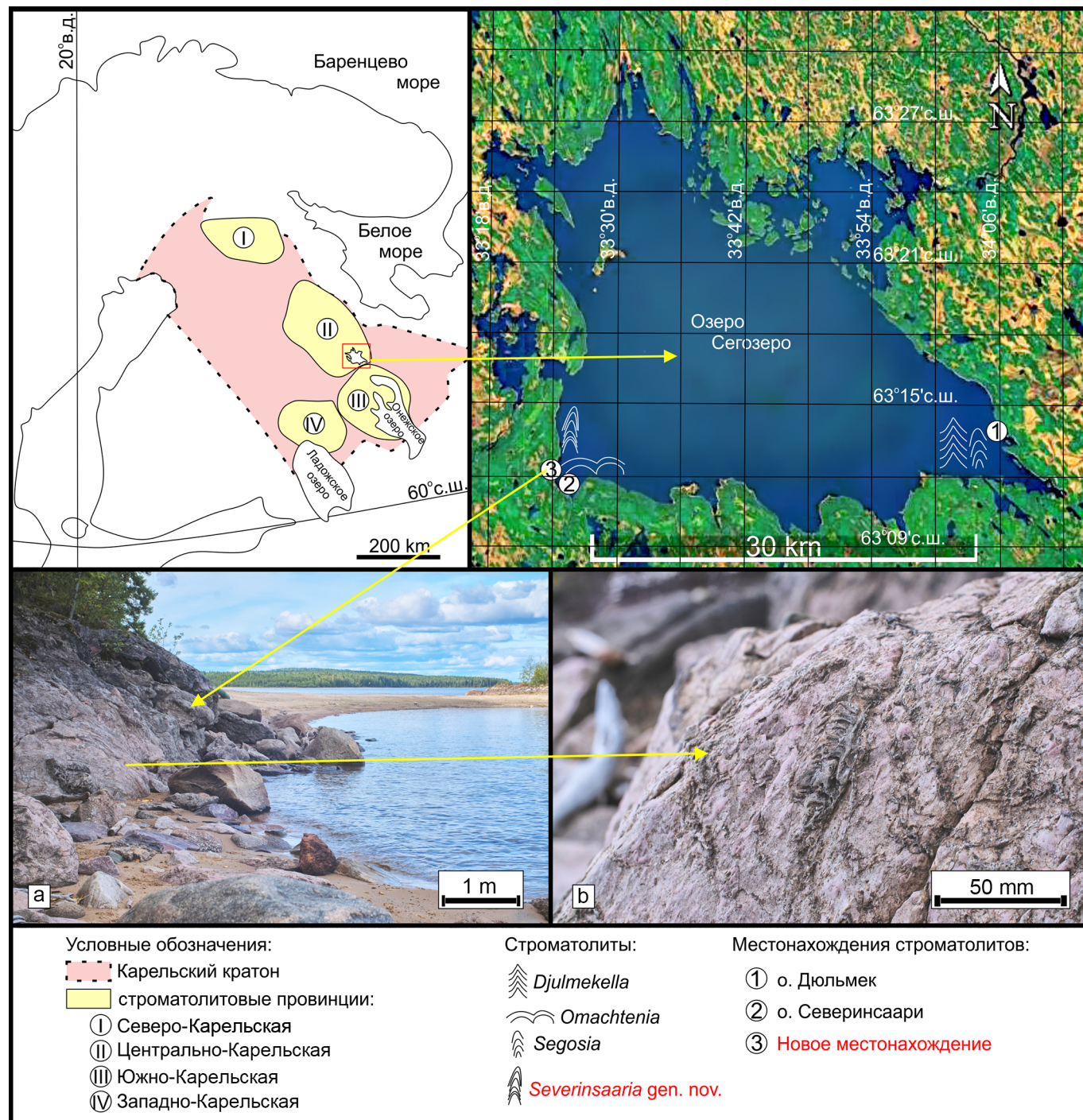


Рис. 1. Восточная часть Фенноскандинавского щита (Карельский кратон) и спутниковая карта района изучения с обозначениями местонахождений строматолитов: а — вид на новое местонахождение (азимут съемки 0°), б — характер выходов доломитов вблизи

Fig. 1. The Eastern part of the Fennoscandian shield (the Karelian craton), satellite map of the study area with location of stromatolites: а — view on a new location (shooting azimuth 0°), б — the nature of dolomite outcrops near

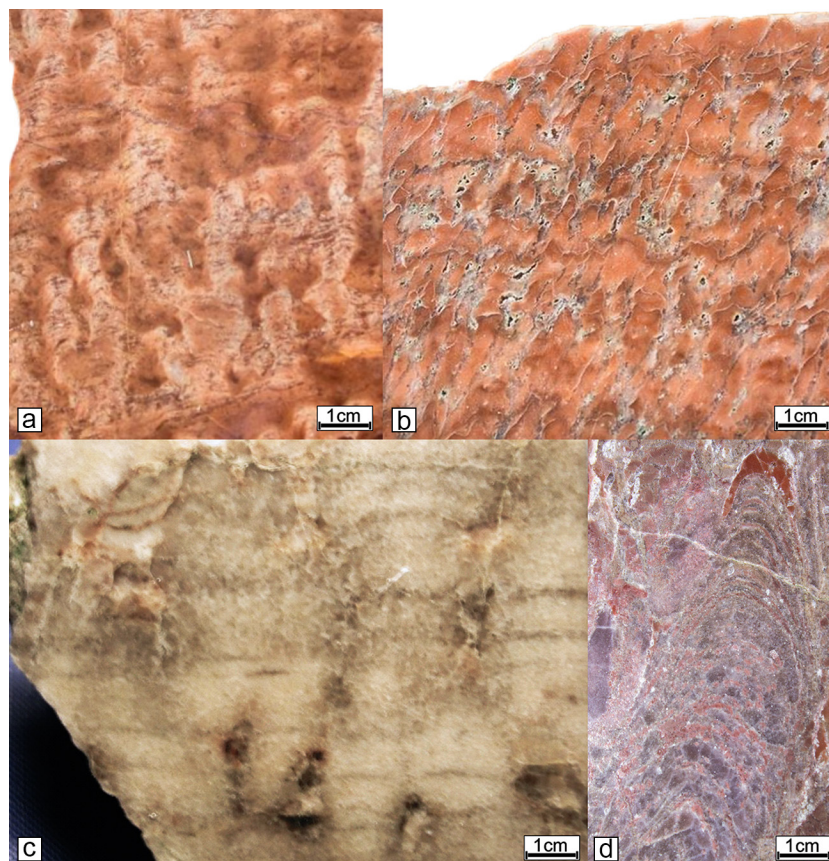


Рис. 2. Продольные сечения строматолитов: а — *Djulfmekella djulfmekensis* Mak., 1983; б — *Segosia columnaris* But., 1966; с — *Omachtenia rhoda* Mak. et Medv., 1992; д — *Severinsaaria* gen. nov. Полированные образцы

Fig. 2. Longitudinal sections of stromatolites: а — *Djulfmekella djulfmekensis* Mak., 1983; б — *Segosia columnaris* But., 1966; с — *Omachtenia rhoda* Mak. et Medv., 1992; д — *Severinsaaria* gen. nov. Polished samples

конгломератами сариольского надгоризонтов. Выше по разрезу залегают кварцевые песчаники, алевролиты и карбонатные породы ятулийского надгоризонта, который подразделяется на сегозерский и онежский горизонты. Под сегозерским горизонтом понимается существенно кварцитопесчаниковая толща. Под онежским горизонтом понимается толща, сложенная преимущественно карбонатными породами (Сацук и др., 1988).

Острова Дюльмек и Северинсаари признаны геологическими памятниками природы в 1984 году. На этих островах выходы розовато-серых доломитов верхнего ятулия (онежский горизонт) образуют уникальный комплекс палеопротерозойских строматолитов, некоторые из них являются единственными в мире (Геологические памятники..., 2006).

Материалы и методы исследования

Фактическим материалом послужили образцы строматолитов, отобранные нами во время полевых работ 2023 года в районе юго-западного берега оз. Сегозеро (Центральная Карелия). В качестве сравнительного материала для настоящего исследования послужили строматолиты *Segosia*, *Djulfmekella*, (о. Дюльмек) и *Omachtenia* (о. Северинсаари) из коллекции Р. В. Бутина и В. В. Макарихина, хранящиеся в музее геологии ИГ КарНЦ РАН.

Образцы строматолитовых построек изучались на сканирующих электронных микроскопах VEGA II LSH (Tescan) при ускоряющем напряжении 20 кВ с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350

(Oxford instruments) и КУКУ (ЦКП Кар НЦ РАН, Петрозаводск). СЭМ-изображения и анализы проводились также на электронном микроскопе ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM с энергодисперсионной приставкой TrueSight EDS 25 mm² (ЦКП «Геонаука», ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар). Анализы проводились при ускоряющем напряжении 10 и 20 кВ, токе зонда 0.85 мкА, размере пучка 180 нм и области возбуждения до 5 мкм. С использованием программного обеспечения xT SEM изучалась морфология микрослоев, исследовался химический состав вмещающей породы, а также проводился поиск возможно сохранившихся остатков цианобактерий. Образцы строматолитовых построек представляют собой шлифы и аншлифы с напыленным бериллием.

Для получения увеличенных снимков образца в отраженном свете использовался оптический микроскоп Tomlov.

Воссоздание формы столбиков строматолитов и их взаимного расположения в породе проводилось на основе метода «графического препарирования» (Крылов, 1963) и применения метода 3D-моделирования. Образец разрезался алмазным диском на параллельные пластины толщиной 5–7 мм, затем контуры строматолитовой колонки с поверхностей распилов фотографировались. Фотографии обрабатывались и накладывались одна на другую в соответствующем порядке. Так восстанавливалась форма столбика внутри породы и строматолитовые столбики графически освобождались от вмещающей породы. В результате получилась обобщенная объемная модель, которая дает возможность

выявить сходство и различие строматолитовых построек с гораздо большей точностью, чем при сравнении отдельных пришлифовок (Лютиков, 2024).

Проведенное трехмерное моделирование позволяет получить изображения пространственных форм исследуемых строматолитов и сравнить с моделями других строматолитов.

Описание разреза о. Северинсаари

В юго-западной части оз. Сегозеро, при низком стоянии воды в озере обнажены коренные выходы и крупные элювиальные глыбы мраморизованного известняка, содержащего послойные скопления пластово-столбчатых построек, среди которых определены *Omachtenia rhoda* Mak. et Medv. (рис. 3).

В этих известняках строматолитовые постройки *O. rhoda* на поверхности напластования узнаются по округлым сечениям столбиков, диаметр которых до-

стигает 2.5–3.0 см. В осевых сечениях построек наблюдаются тесное расположение столбиков, практически незаметное ветвление, слабовыпуклый рисунок строматолитовых наслоений и большое количество соединительных мостиков. Аналогичные строматолиты встречены еще в двух местонахождениях в пределах Сундозерско-Пяозерского биостратотипического района (Макарихин, Кононова, 1983).

На юго-западном побережье оз. Сегозеро, вблизи о. Северинсаари нами изучен ранее неизвестный разрез со строматолитами. В хорошо отмываемом озерным прибоем обнажениях видна верхняя часть сегозерского и нижняя часть онежского горизонтов ятулия: кварцевые конгломераты, кварцитопесчаники с красноватыми алевролитами. Наблюдаются разнообразные слоистые и косослоистые текстуры, знаки ряби и трещины усыхания. Осадочные породы залегают на размытой поверхности базальтовых лав. Верхняя часть разреза представлена пестроцветными обломочными

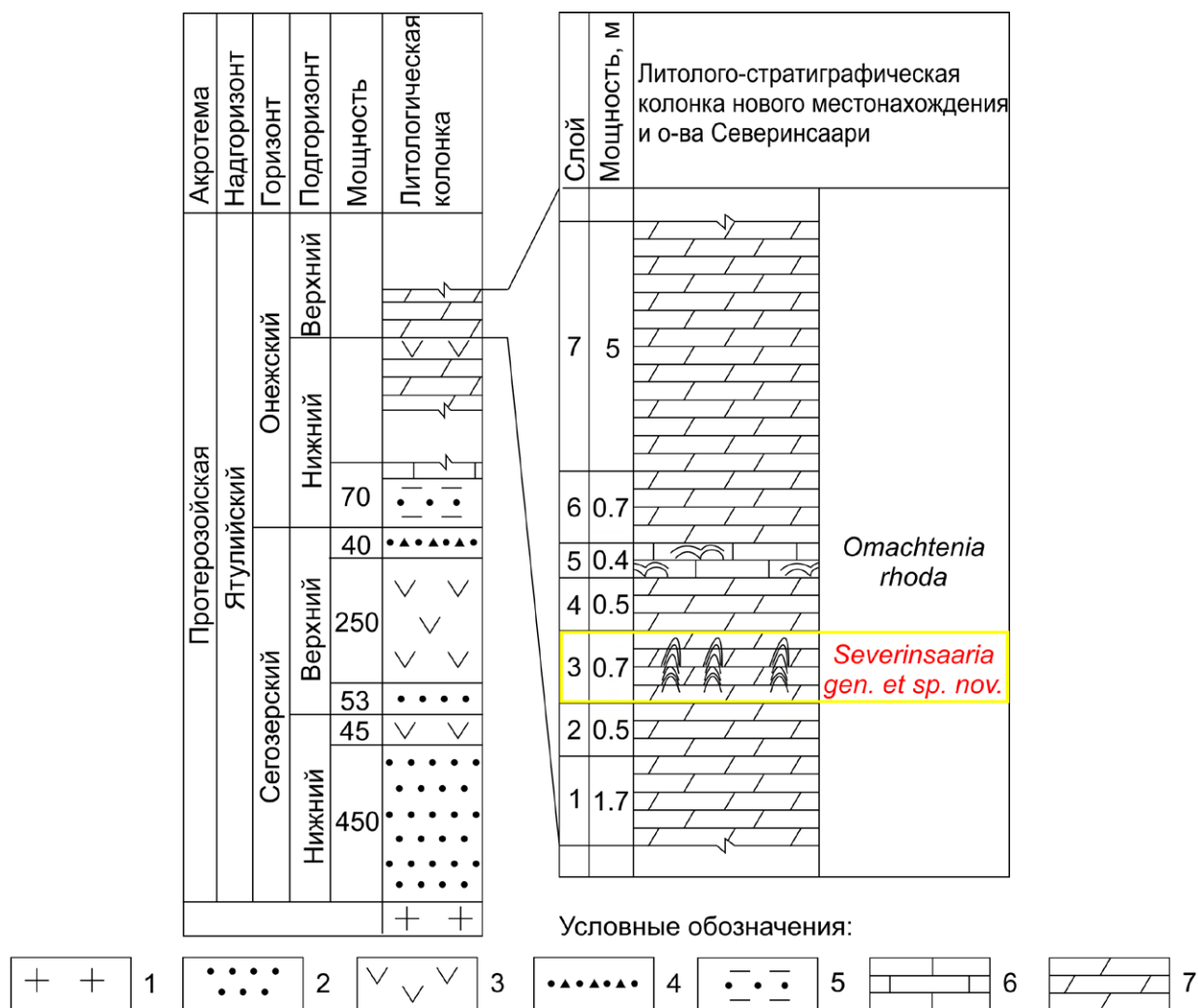


Рис. 3. Общая литологическая колонка района изучения (слева) и положение обнаруженных строматолитов в общем карбонатном разрезе нового местонахождения и о. Северинсаари (справа) (по Макарихин, Кононова, 1983; Сацук и др., 1988 с изменениями). Желтой рамкой выделен слой со строматолитами *Severinsaaria gen. et sp. nov.*

Условные обозначения: 1 — граниты, 2 — кварцитопесчаники, 3 — базальты, 4 — кварцевые конгломераты и кварцитопесчаники, 5 — кварцитопесчаники и алевролиты, 6 — известняки, 7 — доломиты

Fig. 3. General lithological column of the study area (left) and the position of the discovered stromatolites in the general carbonate section of the new location and the island Severinsaari (right) (according to Makarikhin, Kononova, 1983; Satsuk et al., 1988 changed). The yellow frame is marked by a bed with stromatolites *Severinsaaria gen. et sp. nov.*

Symbols: 1 — granites, 2 — quartzite sandstones, 3 — basalts, 4 — quartz conglomerates and quartzite sandstones, 5 — quartzite sandstones and siltstones, 6 — limestones, 7 — dolomites



доломитами, в которых и были найдены строматолитовые постройки, формирующие небольшие (до 1 м протяжённостью) линзовидные биостромы (рис. 3).

Обсуждение результатов

Возможно, что колебание уровня воды на мелководье палеобассейна обусловило в разрезе о. Северинсаари смену изучаемых столбчатых строматолитов *Severinsaaria gen. et sp. nov.* на пластово-столбчатые *Omachtenia sp.*, которые перекрываются осадками. В разрезе на о. Дюльмек цикл повторяется — столбчатые *Segosia* и *Djalmekella* сменяются желваковыми *Collenia sp.* Такая же закономерность в смене морфологических типов наблюдается в Южно-Карельской строматолитовой провинции, в Сундозерско-Пяозерском биостратотипическом районе. Здесь группа столбчатых строматолитов *Carelozoon metzgerii Mak.*, *Sundusia mira Butin*, *Paralleliphyton raigubicum Mak.* выше по разрезу сменяется желваковыми *Colleniella sp.*, *Omachtenia sp.*, затем следует перерыв строматолиитообразования и цикл повторяется — столбчатые *Carelozoon sp.*, *Carelozoon jatulicum Metz.*, *Paralleliphyton strictum Mak.* сменяются желваковыми *Colleniella palica Mak.* и пластовыми *Stratifera sp.* (Макарихин, Кононова, 1983).

Подобные изменения морфологических типов строматолитовых построек зависят от гидродинамических условий среды и скорости поступления обломочного материала: чем выше гидродинамика и больше поступление обломков, тем сложнее форма постро-

ек. Эта закономерность была выявлена при исследовании неопротерозойских строматолитов Бразилии (Bedoya-Rueda et al., 2024), мезопротерозойских строматолитов в Китае (Yang et al., 2022) и современных строматолитов в заливе Шарк-Бей (Logan et al., 1964; Jahnert, Collins, 2012).

Изученные столбчатые строматолитовые постройки имеют размеры от 2 до 7 см высотой. При детальном рассмотрении образца хорошо видна слоистость постройки — биогенные (светлые) и хемогенные (темные) слои (рис. 4). Биогенные слои пелитоморфные, содержат гематит, что придает им красноватый цвет. Хемогенные слои сложены кристаллами кварца. При распиловке образца обнаружилось, что столбики имеют изгиб оси роста, что отчетливо фиксируется в каждой полученной пластинке (толщина 5–6 мм).

При исследовании эродированной части образца на оптическом микроскопе Tomlov уделялось внимание структуре строматолитовых наслоений. Каждый слой четко прослеживается и не прерывается. Отчетливо выделяются хемогенные слои, состоящие из мелкозернистого кварца. В основании столбиков присутствуют крупные окатанные гальки (рис. 5), сложенные чаще всего кварцем, на которых цианобактериальный мат начинал свой рост.

В изученных шлифах с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) прослеживается тонкая строматолитовая слоистость (рис. 6, 7).

При исследовании микроструктуры строматолита *Severinsaaria unica gen. et sp. nov.* с помощью СЭМ

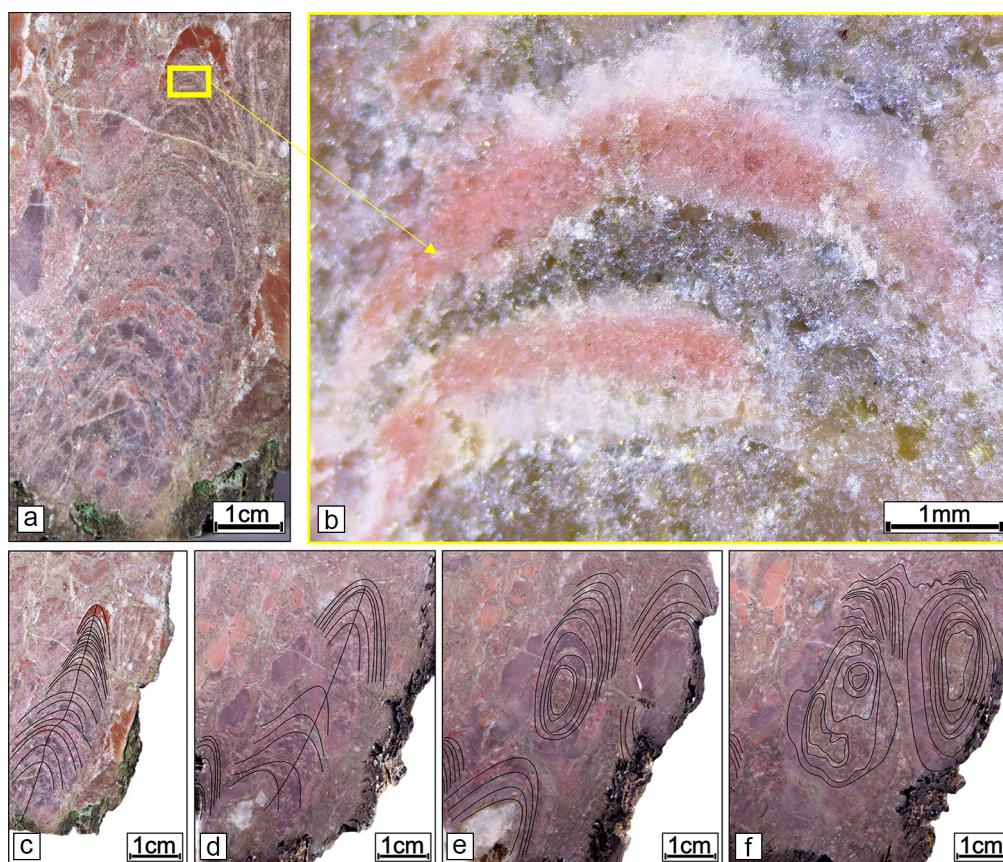


Рис. 4. Голотип *Severinsaaria unica gen. et sp. nov.*, образец 6281, онежский горизонт ятулия, верхний подгоризонт, о. Северинсаари: а — полированный образец, б — увеличенный фрагмент строматолитового столбика, с–ф — продольные пластинки

Fig. 4. Holotype *Severinsaaria unica gen. et sp. nov.*, sample 6281, Onega horizon of the Jatulian, upper subhorizon, i. Severinsaari: а — polished samples, б — enlarged fragment of stromatolite, с–f — longitudinal plates

были выявлены остатки строматолитостроителей в виде бактериальных пленок (рис. 8) и сферических скоплений (рис. 9, а–d). Сферы имеют неровную поверхность и, вероятно, состоят из множества более мелких округлых объектов. Схожие по морфологии скопления сфер были обнаружены в образцах травертина из горячих источников Le Zitelle в Италии (условия среды: $T = 61\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 6.3$) (Carlton et al., 2000). Также в изучаемом образце обнаружены нитеобразные скопления вокруг мелких (2–3 нм) частиц доломита (рис. 9, f).

Нельзя утверждать, что обнаруженные биогенные остатки в строматолитах и следы их активности являются *in situ*; организмы могли попасть уже в сформированную породу в процессе литогенеза. Однако сравнительный морфологический анализ обнаруженных форм показывает определенное сходство с подтверж-

дёнными палеопротерозойскими фоссилиями — кокками и нитевидными формами, обнаруженными в углеродистых сланцах и туфогенно-осадочных породах Хизоваарской зеленокаменной структуры, а также в корах выветривания палеопротерозоя оз. Паанаярви (Ископаемые..., 2011).

В целом образец сложен однотипно — переслои массивного доломита с редкими его кристаллами, а также зерна кварца. Встречаются такие минералы, как биотит, гематит, сфен, пирит, клиноэнстатит (рис. 9, e). Сохранившиеся биогенные остатки крайне мало, в основном они присутствуют в пустотах породы.

С помощью метода трёхмерного моделирования была воссоздана морфология столбиков *Severinsaaria* gen. nov. Благодаря этому удалось провести сравнение не только физических образцов, но и виртуальных (рис.

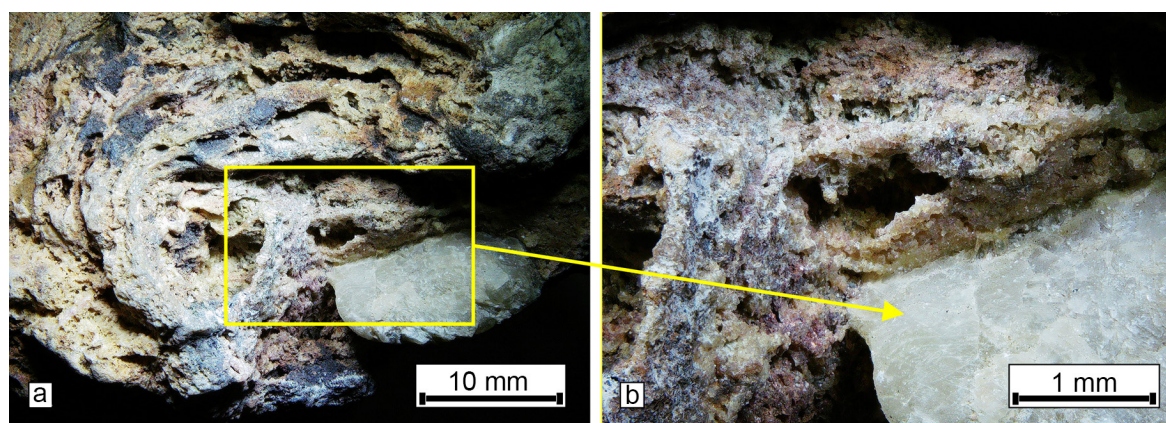


Рис. 5. Характер выветривания доломита со столбиками строматолита *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov. под оптическим микроскопом Tomlov: А — структура строматолита; В — основание строматолитовой постройки с крупной галькой кварца

Fig. 5. The weathering pattern of dolomite with columns of *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov. under an optical microscope Tomlov: A — structure of stromatolite; B — base of the buildup with large quartz pebble

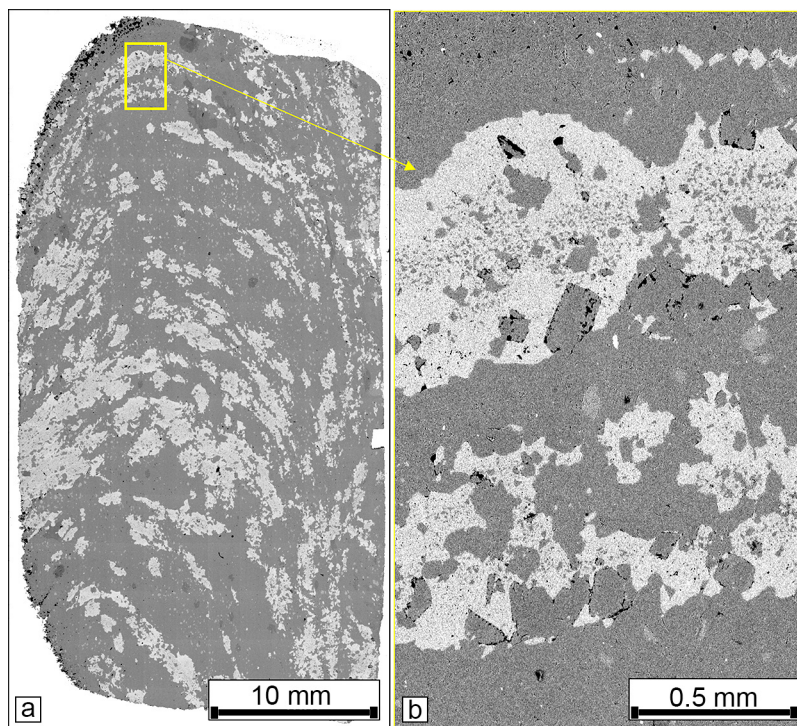


Рис. 6. СЭМ-изображение микротекстуры строматолита *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov.: а — характер строматолитовых наслоений, б — увеличенный фрагмент наслоений

Fig. 6. SEM images showing the microtextural characteristics of stromatolite *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov.: а — stromatolite lamination, б — enlarged fragment of а

10). Оказалось, что изучаемые строматолиты отличаются от сравниваемых не только общим размером построек и морфологией, но и характером роста, наслоений, а также расположением столбиков относительно друг друга. *Severinsaaria* gen. nov. не обладает ветвлением, каждый столбик представляет собой отдельную постройку, в отличие от *Segosia*, *Djalmekella*, *Omachtenia*, у которых столбики располагаются очень близко друг к другу и часто имеют соединительные мо-стики.

Описание строматолита

Принцип и структура описания строматолита основаны на материалах предшественников (Макарихин, Кононова, 1983; Макарихин, 2011).

Род *Severinsaaria* gen. nov. (подотдел Stromatoliphytina).

Происхождение названия рода связано с наименованием острова Северинсаари, вблизи которого встречаются эти строматолиты.

Tun pada Severinsaaria unica, gen. et sp. nov. Центральная Карелия, онежский горизонт ятулия.

Диагноз. Постройка в виде столбика с конусной верхушкой. Строматолитовые наслоения хорошо выражены и заметны на отполированной поверхности в виде чередования красноватых и фиолетовых слоев. Рядом присутствуют еще несколько столбиков меньшего размера. Они имеют общее основание, но в процессе роста отделяются друг от друга, формируя отдельные постройки с явно выраженными арками. Ветвления столбиков не обнаружено. Вмещающий доломит грязно-белого цвета на выветрелой поверхности, но при разрезе и полировке обнаружился лилово-коричневые и оранжевые включения, обусловленные примесью гематита.

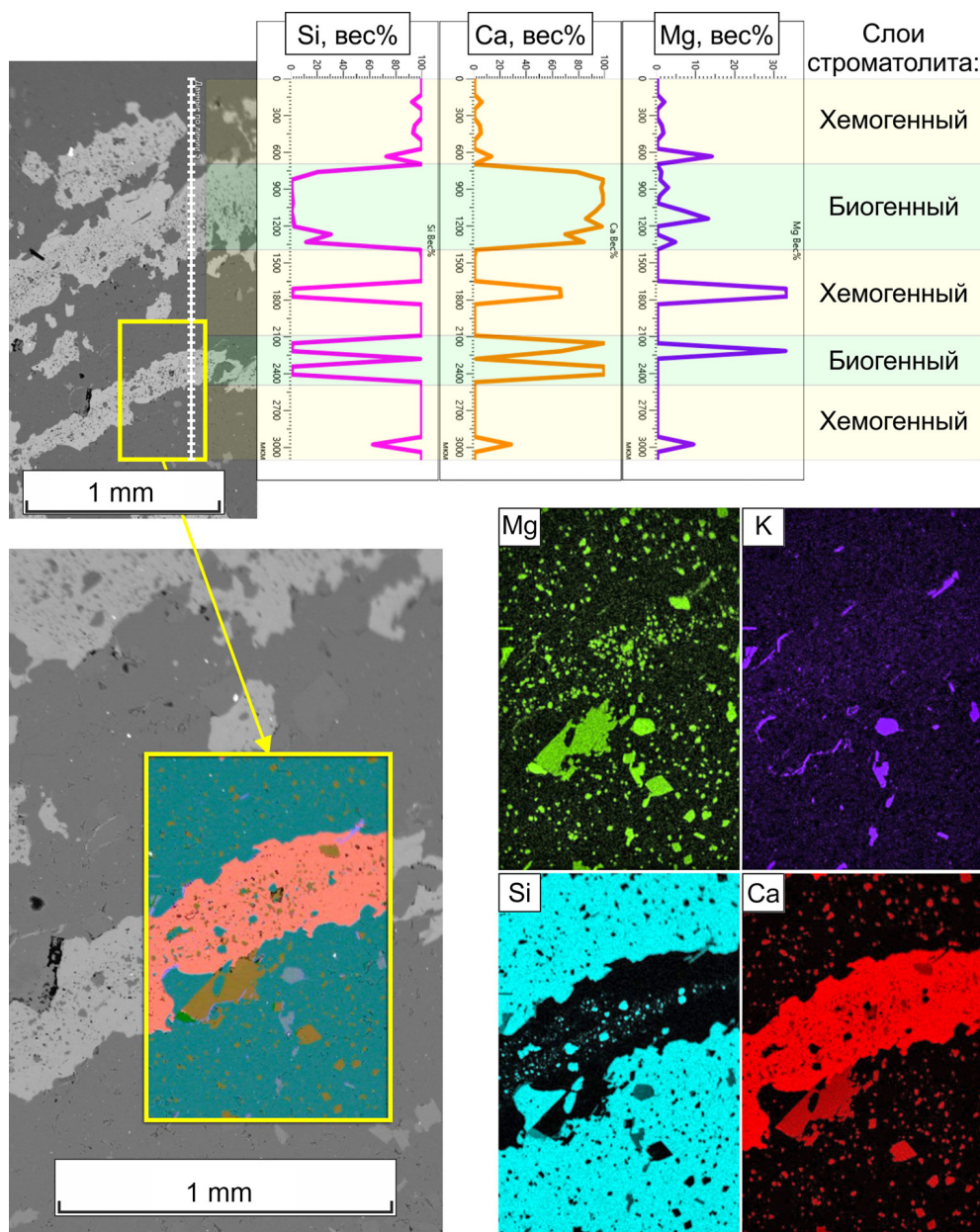


Рис. 7. SEM-изображения шлифа *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov.: картирование и распределение элементов по профилю перпендикулярно слоистости

Fig. 7. Thin section SEM image of *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov.: mapping and distribution of elements along the profile perpendicular to the lamination

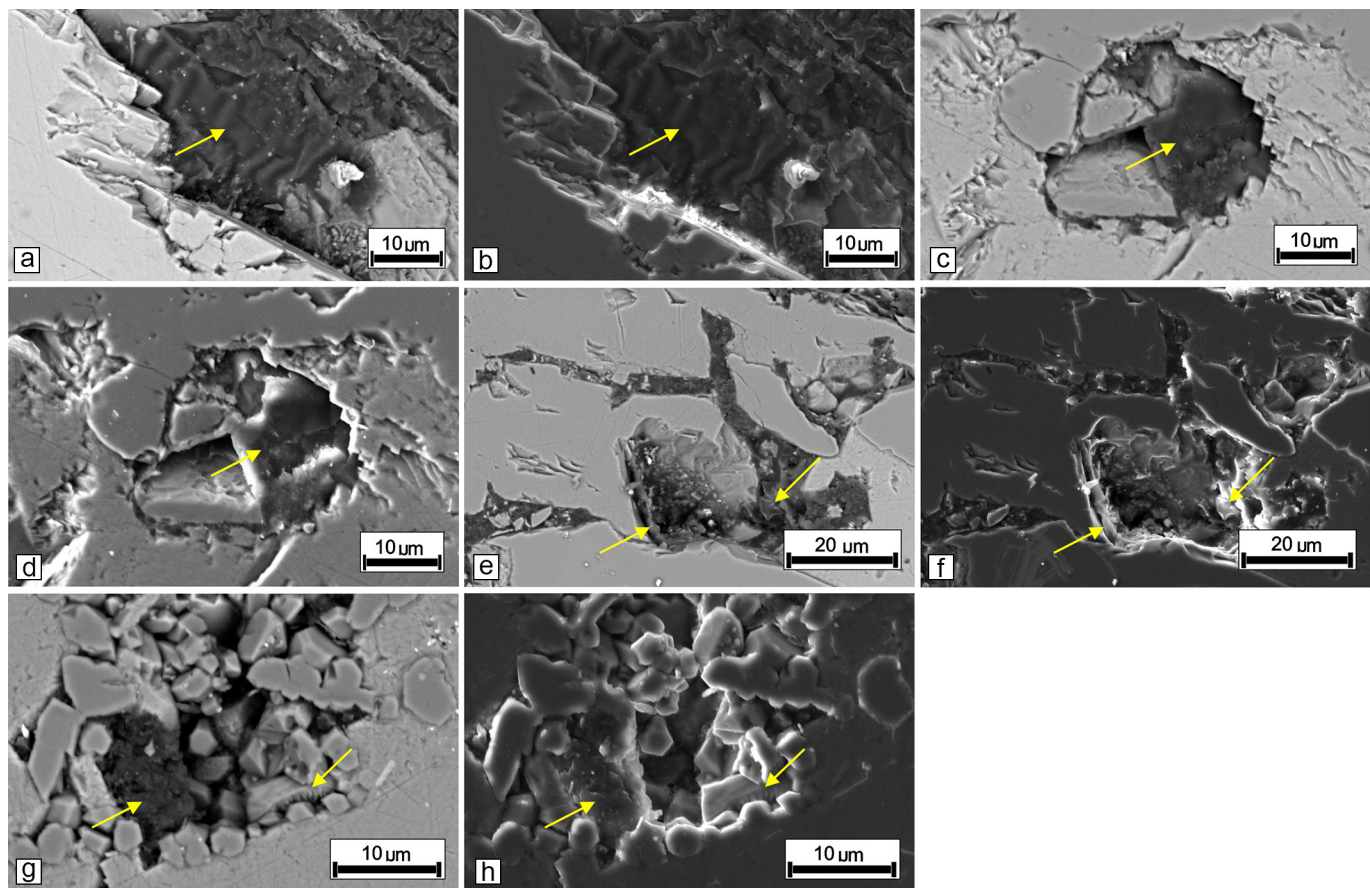


Рис. 8. Ультрамикроструктуры в палеопротерозойских строматолитах *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov.: a–h — биопленки; a, c, e, g — BSE-детектор; b, d, f, h — SE-детектор

Fig. 8. Ultramicrostructures in Paleoproterozoic stromatolites of *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov.: a–h — biofilms. a, c, e, g — BSE detector; b, d, f, h — SE detector

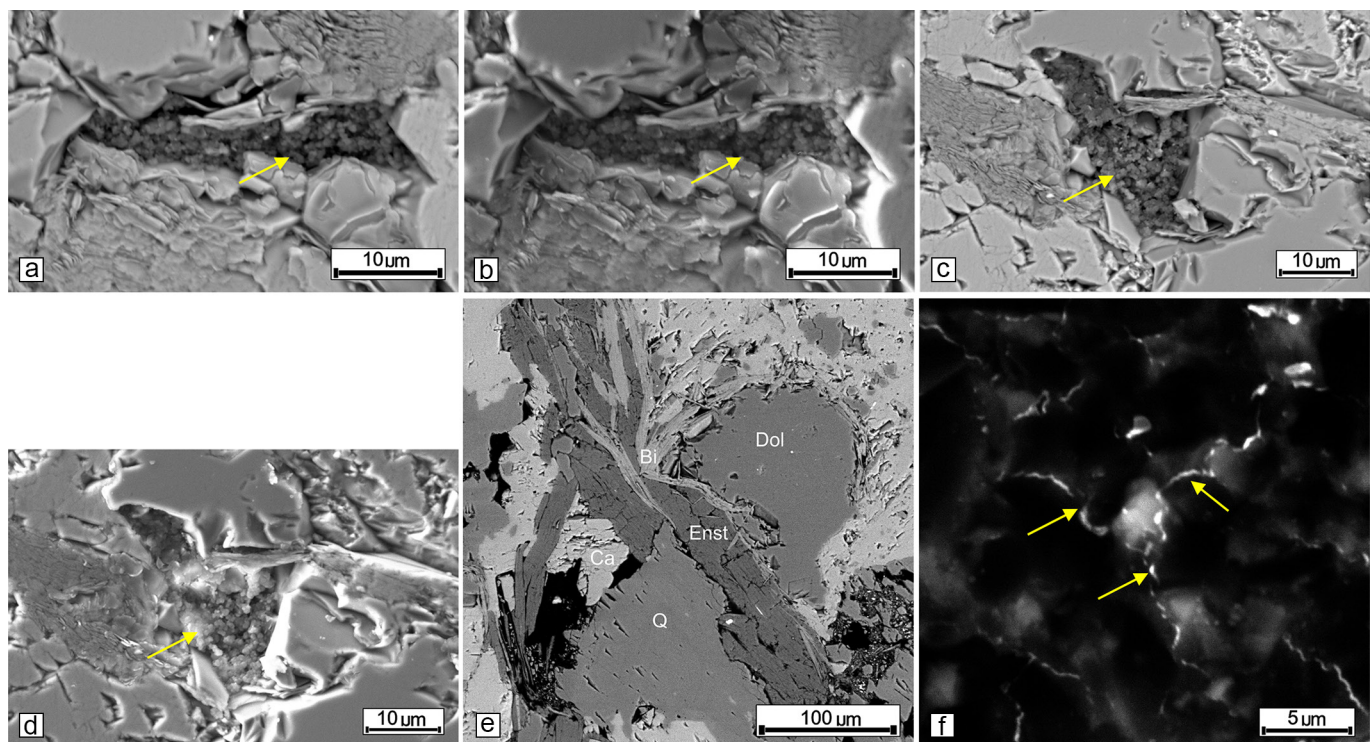


Рис. 9. Ультрамикроструктуры в палеопротерозойских строматолитах *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov.: a–d — скопления сферических форм: a, c — BSE-детектор; b, d — SE-детектор; e — зерна клиноэнстатита, BSE-детектор; f — песчинка, опутанная нитеобразными формами, SE-детектор

Fig. 9. Ultramicrostructures in Paleoproterozoic stromatolites of *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov.: a–d — clusters of spherical forms: a, c — BSE detector; b, d — SE detector; e — clinoenstatite grains, BSE-detector; f — a grain of dolomite entangled in filamentous forms, SE detector

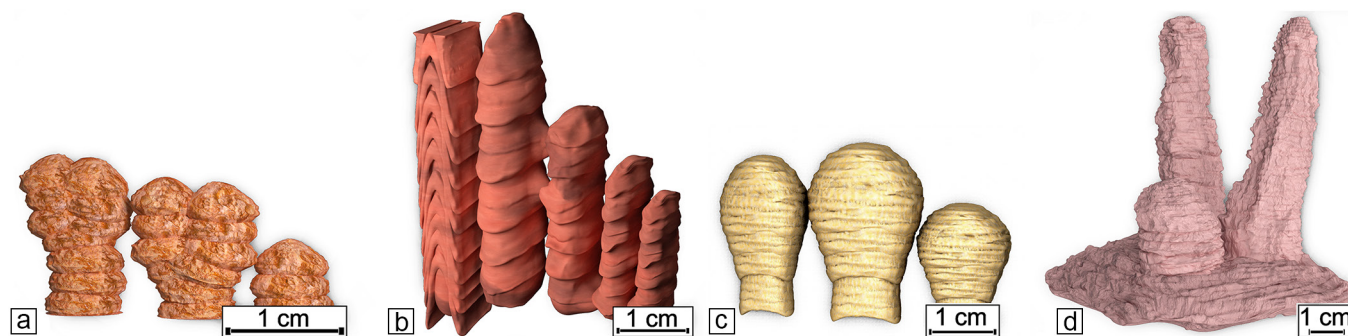


Рис. 10. 3D-модели палеопротерозойских строматолитов, созданные с помощью программы Blender: а — *Djulmekella*; б — *Segosia*; в — *Omachtenia*; д — *Severinsaaria* gen. nov.

Fig. 10. 3D models of stromatolites build by Blender software: а — *Djulmekella*; б — *Segosia*; в — *Omachtenia*; д — *Severinsaaria* gen. nov.

Состав рода. Один вид *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov.

Сравнение. От рода *Segosia* и *Djulmekella* отличается более крупным размером (шириной) и характером столбиков, а также отсутствием ветвления. Характер роста построек *Segosia* и *Djulmekella* представляет собой, как правило, несколько столбиков, плотно находящихся вместе, в отличие от *Severinsaaria*, представленного единичными отдельными крупными столбиками. Угол наклона арок более пологий в отличие от сравниваемых строматолитов. Цвет породы также отличается: у *Severinsaaria* буро-малиновый, красноватый, а у *Segosia* и *Djulmekella* оранжевый. Отличия в цвете связаны с присутствием различных примесей в породе.

Морфологией постройки и размерами новый род похож на *Conophyton* Maslov, но у *Severinsaaria* отсутствует осевая зона (конус в конусе), что является главным признаком *Conophyton*. Однако есть некоторое сходство. Например, столбики *Conophyton minusculum* Semikhatov (формация Рокнест серии Эупорт, Канадский щит) имеют искривленные оси, а также начинают рост от общего пластинчатого основания, как и *Severinsaaria*. Такие же особенности проявлены и у *Murmania sidorenkia* Ljubtsov (Печенгский комплекс, Кольский полуостров). Последняя особенность присуща многим строматолитам, поэтому не является значимой. От рода *Colonella* Komar (тоже неветвящихся столбчатых строматолитов) отличается крутым характером арок.

Геологический возраст и распространение. Онежский горизонт ятулия, юго-западный берег оз. Сегозеро, Центральная Карелия.

Severinsaaria unica gen. et sp. nov. (см. фото выше)

Голотип. Обр. 6281, коллекция лаборатории геологии и геодинамики докембрия ИГ КарНЦ РАН, юго-западный берег оз. Сегозеро (Карелия). Онежский горизонт ятулия.

Происхождение названия вида от лат. *unique* — уникальный.

Описание. Крупные единичные столбики изогнутой конусообразной формы, высотой около 7 см, шириной 2 см. Ось столбика имеет изгибы. Арки довольно острые и облекают нижележащие прослои. Видимые темные и светлые наслоения имеют толщину от 2 до 4 мм. В образце присутствуют обломочный карбонатный материал оранжевого цвета, напоминающий тот, из которого сложены *Segosia*, но в данном случае постройки не сформированы.

Сравнение. В настоящее время выделен только один вид этого рода.

Материал. Образец 6281: 2 крупных обломка, 6 шлифов, 3 тонких среза (пластинки) хранятся в лаборатории геологии и геодинамики докембрия ИГ КарНЦ РАН.

Геологический возраст и распространение. Верхний подгоризонт онежского горизонта ятулия, юго-западный берег оз. Сегозеро, Центральная Карелия.

Заключение

Таким образом, описан новый род строматолитов, представленный одним видом *Severinsaaria unica* gen. et sp. nov. Морфология постройки контролировалась средой обитания. Находка данного строматолита дополнила закономерную картину смены морфологии строматолитовых построек: от столбчатых к пластинчатым вверх по разрезу. Изучение с помощью СЭМ и 3D-моделирования, а также описание в качестве нового рода позволили расширить знания о палеопротерозойских строматолитовых постройках и их разнообразии в восточной части Фенноскандинавского щита. Полученные результаты позволят дополнить существующую базу данных палеопротерозойских микробиолитов Карелии, а также будут задействованы в будущем при фациальных реконструкциях осадочных палеобассейнов на Карельском кратоне.

Авторы выражают благодарность младшему научному сотруднику А. А. Федорову (ЦКП ИГ КарНЦ РАН) и научному сотруднику, к. г.-м. н. И. Л. Потапову (ЦКП «Геонаука», ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) за помощь в проведении исследования на сканирующих электронных микроскопах, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания по содержанию статьи.

Работа выполнена в рамках государственного бюджетного финансирования темы № 215 НИР Института геологии КарНЦ РАН.

Литература / References

- Астафьева М. М., Герасименко Л. М., Гефтнер А. Р. и др. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / Науч. ред. А. Ю. Розанов, Г. Т. Ушантинская. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.
- Astafyeva M. M., Gerasimenko L. M., Geptner A. R. et al. Fossil bacteria and other microorganisms in Earth rocks

- and astromaterials. Sci. Eds. Rosanov A. Yu., Ushatinskaya G. T. Moscow: PIN RAS, 2011, 172 p. (in Russian)
- Геологические памятники природы Карелии. Петрозаводск: Карелия, 2006. 192 с.
- Geological sites of Karelia. Petrozavodsk: Karelia, 2006, 192 p. (in Russian)
- Дмитриева А. В., Кулешевич Л. В. Геологическое строение, позднеархейский интрузивный магматизм и металлогения Ондозерско-Сегозерской площади (Карелия) // Отечественная геология. 2018. № 1. С. 40–54.
- Dmitrieva A. V., Kuleshevich L. V. Geological structure, Late Archean intrusive magmatism and metallogeny of the Ondozero-Segozero prospect, Karelia. *Otechestvennaya geologia*. 2018, No. 1, pp. 40–54. (in Russian)
- Крылов И. Н., Столбчатые ветвящиеся строматолиты рифейских отложений Южного Урала и их значение для стратиграфии верхнего докембрия // Труды ГИН АН СССР. 1963. № 69. 175 с.
- Krylov I. N. Columnar branching stromatolites of the Riphean deposits of the Southern Urals and their significance for the stratigraphy of the Upper Precambrian. *Proceedings of GIN of the USSR AS*. 1963, No 69, 175 p. (in Russian)
- Лютиков А. В. Палеопротерозойские строматолиты восточной части Фенноскандинавского щита: микроструктура и 3D-моделирование // Вестник геонаук. 2024. № 3(351). С. 15–19. DOI: 10.19110/geov.2024.3.2
- Lyutikov A. V. Paleoproterozoic stromatolites Segosia columnaris and Sundosia mira of the Eastern part of the Fennoscandian Shield: microstructure and 3D modeling. *Vestnik of Geosciences*, 2024, No 3(351), pp. 15–19. (in Russian)
- Макарихин В. В. Палеонтологические исследования палеопротерозоя Карелии // Геология Карелии от архея до наших дней: Материалы докладов Всеросс. конф. посвящ. 50-летию Института геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2011. С. 71–78.
- Makarihin V. V. Paleontological study of the palaeoproterozoic rocks in Karelia. *Geology of Karelia from the Archaean to the present*. Proceedings of the All-Russian Conference convened to celebrate the 50th anniversary of the founding of the Institute of Geology, Karelian Research Centre, RAS. Petrozavodsk: Institute of Geology, KarRC RAS, 2011, pp. 71–78. (in Russian)
- Макарихин В. В., Кононова Г. М. Фитолиты нижнего протерозоя Карелии. Л.: Наука, 1983. 180 с.
- Makarihin V. V., Kononova G. M. Lower Proterozoic phytolites of Karelia. Leningrad: Nauka, 1983, 180 p. (in Russian)
- Макарихин В. В. Геологические памятники природы // Геология и охрана недр Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. С. 60–98.
- Makarihin V. V. Natural geological monuments // *Geology and protection of mineral wealth of Karelia*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. 1992, pp. 60–98. (in Russian)
- Макарихин В. В., Медведев П. В., Рычанчик Д. В. Роль биотического фактора в ятулийском седиментогенезе // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерализация Северо-Запада России: Материалы Всеросс. конф. Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, 2007. С. 241–245.
- Makarihin V. V., Medvedev P. V., Rychanchik D. V. The role of the biotic factor in the jatulian sedimentation. *Geodyn. Magm. Sedim. Miner. of the North-West Russia*. Petrozavodsk: IG KarRC RAS, 2007, pp. 241–245. (in Russian)
- Проблемы стратиграфии нижнего протерозоя Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1989. 159 с.
- Problems of stratigraphy of the Lower Proterozoic of the Karelia. Petrozavodsk: Karelian branch USSR AS, 1989. 159 p. (in Russian)
- Сацук Ю. И., Макарихин В. В., Медведев П. В. Геология ятулия Онего-Сегозерского водораздела. Л.: Наука, 1988. 96 с.
- Satsuk Yu. I., Makarihin V. V., Medvedev P. V. *Geology of the Jatulia Onego-Segozersky watershed*. Leningrad: Nauka, 1988, 96 p. (in Russian)
- Bedoya-Rueda, C., Afonso, J., Caetano-Filho, S., Paula-Santos, G., Guacaneme, C., Fraga-Ferreira, P., Babinski, M., Amorim, K. B., Morais, L., Brito Neves, B., Trindade, R.I.F., Stratigraphic-chemostratigraphic assessment of early dolomitization and associated phosphogenesis of the Ediacaran-Cambrian Salitre Formation, Irecê Basin, Brazil // *Precambrian Research*. 2024. V. 412. 107541.
- Carlton C. Allen, Fred G. Albert, Henry S. Chafetz, Joan Combie, Catherine R. Graham, Thomas L. Kieft, Steven J. Kivett, David S. McKay, Andrew Steele, Anne E. Taunton, Michael R. Taylor, Kathie L. Thomas-Keprta, Frances Westall *Microscopic Physical Biomarkers in Carbonate Hot Springs: Implications in the Search for Life on Mars* // *Icarus*. 2000. 147. P. 49–67. DOI:10.1006/icar.2000.6435
- Jahnert R. J., Collins L. B. Characteristics, distribution and morphogenesis of subtidal microbial systems in Shark Bay, Australia // *Marine Geology* 2012. 303–306. P. 115–136.
- Logan B. W., Rezak R., Ginsburg R. N. Classification and Environmental Significance of Algal Stromatolites // *The Journal of Geology* 1964. Vol.72. No.1. P. 69–83.
- McLoughlin N., Melezhik V. A., Brasier A. T., Medvedev P. V. Palaeoproterozoic stromatolites from the Lomagundi-Jatuli interval of the Fennoscandian Shield // *The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia — Drilling Early Earth Project / Reading the Archive of Earth's Oxygenation*. Volume 1 / Eds V.A. Melezhik, A.R. Prave, A.E. Fallick et al. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. P. 1297–1405.
- Riding R. Classification of microbial carbonates // *Calcareous algae and stromatolites*. / Ed. R. Riding. Berlin: Springer-Verlag, 1991. P. 21–51.
- Riding R. Microbialites, stromatolites, and thrombolites J. Reitner, V. Thiel (Eds.), *Encyclopedia of Geobiology, Encyclopedia of Earth Science Series*, Springer, Heidelberg, 2011. P. 635–654.
- Yang H., Chen Zh.-Q., Papineau D. Cyanobacterial spheroids and other biosignatures from microdigitate stromatolites of Mesoproterozoic Wumishan Formation in Jixian, North China // *Precambrian Research*. 2022. Vol. 368. 106496. DOI: 10.1016/j.precamres.2021.106496

Поступила в редакцию / Received 18.04.2025



Геология рифов – 2025. Итоги Geology of reefs – 2025. Results

On June 23–25, 2025, the All-Russian Lithological Conference with International Participation «Geology of Reefs — 2025» was held at the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS under the auspices of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and the Scientific Council on Lithology and Sedimentary Minerals of the Earth Sciences Department RAS.

The program enlightened the study of reefogenic deposits in three areas: lithology and geochemistry of carbonate platforms and organogenic buildups, bacterial lithogenesis, and oil and gas potential of carbonate deposits. The conference also focused on the isotopic and geochemical characteristics of reef rocks, the modern formation of marine carbonates and organogenic buildups, and the role of gas fluids in the formation of bottom-level carbonates.

The meeting was attended by representatives of more than forty scientific and industrial organizations and universities from Russia, Thailand and Kazakhstan. During practical classes of the youth school, young researchers studied samples and thin sections from the Upper Carboniferous and Lower Permian skeletal hills of the Northern and Subpolar Urals, and the structure of microbialites in the Lower Carboniferous deposits (Unya River, Northern Urals). The speakers noted the richness of the program and a high quality of the reports.

23–25 июня 2025 г. в Институте геологии имени академика Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН под эгидой Министерства науки и высшего образования РФ и Научного совета по проблемам литологии и осадочным полезным ископаемым при Отделении наук о Земле РАН состоялось Всероссийское литологическое совещание с международным участием «Геология рифов — 2025».

Органогенные сооружения имели широкое распространение на Земле практически во всех геологических эпохах. Рифовая экосистема чутко реагирует на изменения палеогеографических и климатических условий, поэтому характер распределения рифогенных отложений важен для распознавания обстановок и восстановления эволюции осадконакопления в геологической истории, а также для палеотектонических реконструкций. Традиционно вопросы эволюции рифовых экосистем и диагностика древних органогенных сооружений являются основными в тематике совещания. В этом году, кроме того, получили широкое освещение результаты исследований изотопно-геохимических особенностей рифовых пород, процессов современного образования морских карбонатов, а также влияния газифлюидов на формирование придонных карбонатных построек.

Актуальность выбранных тематик совещания обусловила интерес специалистов в разных областях гео-

логии. Были представлены доклады 131 участника из 44 научных, научно-производственных, производственных организаций и высших учебных заведений России и зарубежья. География совещания охватывала такие города, как Альметьевск, Владивосток, Волгоград, Геленджик, Екатеринбург, Ижевск, Казань, Красноярск, Магадан, Москва, Новосибирск, Пермь, Петрозаводск, Самара, Санкт-Петербург, Севастополь, Сыктывкар, Тюмень, Уфа, Ухта. Двое участников были зарегистрированы из Банкока (Таиланд) и один из Атырау (Казахстан). Кроме того, среди участников совещания было значительное количество слушателей, непосредственно присутствовавших на заседаниях и подключившихся к системе видеоконференций.

В ходе работы совещания на пленарном и секционных заседаниях из 56 заявленных было представлено 53 доклада (3 пленарных, 39 секционных и 11 стендовых). Разнообразие тематики отражает проблемы карбонатной литологии, биоседиментологии и связанные с ними практические выводы и результаты, интересующие не только специалистов по нефтяной геологии, но и исследователей современных океанических областей и актуальных процессов аутигенного карбонатообразования. Возрастной диапазон представленных в материалах совещания ископаемых рифов, органогенных построек и микробиалитов находится в пределах от рифея до современности, а территорияльно они охватывают районы от Приморья до европейской части России, от Северной Атлантики до севера Тихого океана. Доклады, представленные на тематических секциях, показали широкое использование электронно-микроскопических, палеоэкологических, геохимических, в том числе изотопных, методов и новейших методик сейсморазведки.

На открытии совещания прозвучали приветственные слова директора Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН И. Н. Бурцева, председателя научного совета по проблемам литологии и осадочных полезных ископаемых Ю. О. Гаврилова, члена Общественной палаты РФ Ю. В. Лисина, было зачитано обращение к участникам совещания председателя программного комитета совещания, члена бюро НС ЛОПИ В. Г. Кузнецова. Было отмечено, что «рифовые совещания» в Институте геологии стали уже традиционными и являются площадками для встречи ведущих ученых-литологов и специалистов нефтегазовой отрасли. Выступающие подчеркивали важность проведения подобного рода мероприятий, когда устанавливается прямая связь между наукой и производством, а новые идеи в области изучения карбонатных отложений и перспектив их нефтегазоносности находят поддержку и получают импульс для дальнейшего плодотворного развития.

В программе совещания были рассмотрены аспекты изучения рифогенных отложений в трех направлениях: 1) литология и геохимия карбонатных платформ и органогенных сооружений; 2) бактериальный



Участники совещания. Фото Д. А. Груздева
Participants of the meeting. Photo by D. A. Gruzdev

литогенез; 3) нефтегазоносность карбонатных отложений.

В первой секции основная группа докладов была посвящена общим вопросам эволюции фанерозойского рифообразования и формирования карбонатных платформ в геобиосферной системе Тимано-Североуральского региона (А. И. Антошкина), Печоро-Баренцевоморского региона (Н. В. Танинская, Н. Я. Васильев, М. А. Мясникова, В. Н. Зельцер, М. Н. Грислина, А. Н. Меркулова, И. С. Низязева), архипелага Новая Земля (В. П. Матвеев, А. Б. Тарасенко), Южного Приуралья (Е. Н. Горожанян, В. М. Горожанин, Т. Н. Исакова, Т. В. Филимонова, Н. С. Сагдеева, Е. И. Кулагина, Р. Е. Семенов), Уринского поднятия Патомского нагорья Сибирской платформы (Д. В. Гражданкин, В. О. Максименко), Русской и Южно-Китайской платформ (А. В. Дронов, В. Б. Кушлина), Южного Дагестана (Ю. О. Гаврилов), южной зоны Западного Кавказа (Н. В. Глазырина, Е. А. Глазырин), Средиземноморья и Восточного Паратетиса (Ю. В. Ростовцева). Самоорганизация, архитектура и эволюция биогенных структур рассматривались на примерах конкретных органогенных построек, таких как коралловые органогенные постройки средней и поздней юры Юго-Восточного Крыма (К. А. Шустиков, И. Ю. Бугрова, К. А. Дубкова) и раннего карбона Среднего урала на р. Исеть (Н. К. Николенко), строматолиты ятулия Карелии (А. В. Лютиков, П. В. Медведев) и позднего рифея Южного Урала (Г. Ф. Поливкин, Д. В. Гражданкин; С. А. Дуб, М. Т. Крупенин). Эволюция биоценозов в процессах образования органогенных построек рассматривалась Н. А. Лыковым, И. А. Китаевой, О. В. Постниковой, В. А. Лошкаревой (Сахайская органогенная полоса, Восточная Сибирь), роль отдельных групп организмов — Е. В. Антроповой (строматопоридеи), Ю. А. Гатовским, Г. А. Калмыковым, Ю. А. Котчиковой, А. Г. Мизенс (рецептакулиты), А. В. Пахневичем (брахиоподы), А. П. Прониным (известковые водоросли), Л. В. Соколовой (конодонты), Н. А. Матвеевой, Р. М. Ивановой (цианобактерии и известковые водо-

росли). Среди докладов данной секции выделялось сообщение гостей из Таиланда П. Путтхапибана (Prinya Putthapiban) и П. Хонга (Panus Hong) «Ордовикские псевдостроматолитовые текстуры в обнажениях геологического памятника „Наутилоиды“, Бан Тха Крадан, Шри Сават округ, Канчанабури, Западный Таиланд». Авторами было показано, как постседиментационные процессы и влияние тектонических процессов образовали текстуры в карбонатных породах, напоминающие строматолитовые.

В секции «Бактериальный литогенез» большая часть докладов была посвящена роли бактериального литогенеза и флюидных высачиваний в аутигенном минералообразовании: гидротермально-бактериальных построек на поверхности эффузивных пород Тессельского палеовулкана Южного берега Крыма (В. И. Лысенко), в пограничных разрезах юры-мела арх. Шпицберген (К. Ю. Васильева, М. А. Рогов, В. Б. Ершова, К. Ю. Михайлова, В. А. Захаров), карбонатных корок, ооидов и микросферолитов (А. И. Антош-



Зал заседаний был полон все дни работы совещания. Фото В. А. Матвеева
The conference hall was full on all days of the meeting.
Photo by V. A. Matveev



кина, Л. В. Леонова, Ю. С. Симакова), гётитовых фрамбоидов в верхнесилурийских отложениях в бассейне р. Шугер на Приполярном Урале (В. А. Салдин, Б. А. Макеев, А. С. Шуйский).

В секции «Нефтегазоносность карбонатных отложений» в этом году количество докладов (11) было не таким большим, как на прошлых совещаниях. И причина сокращения заключается не в нежелании специалистов нефтегазовой отрасли участвовать в работе совещания, на что указывает большое количество слу-



Ю. О. Гаврилов (ГИН РАН, Москва) с выступлением на заключительном заседании. Фото Д. А. Груздева

Y. O. Gavrillov (GIN RAS, Moscow) with a speech at the final session. Photo by D. A. Gruzdev

шателей, представителей научно-исследовательских отделов производственных организаций или профильных институтов и центров, а в многочисленных бюрократических препонах или, возможно, излишней закрытости геологической информации. Может быть, именно поэтому на суд научной общественности не были представлены сообщения в области анализа распределения лито- и сейсмofаций рифовых тел в областях нефтегазонакопления.

В основной части докладов секции приводились результаты комплексного анализа нефтегазоносных провинций (НГП) и выявленных закономерностей развития на этих территориях рифогенных отложений, перспективных для поиска месторождений нефти и газа. В частности, докладывалось о разнообразии поисковых объектов верхнего девона Рубежинского прогиба, Благовещенской впадины, Бирской седловины (Р. В. Мирнов, Л. Н. Чанышева), об особенностях морфологии эйфельско-позднеживетских карбонатных платформ и строения органогенных построек этого времени (А. П. Вилесов, Н. Ю. Гребенкина, А. В. Филичев), о взаимосвязи основных фаз рифообразования с развитием нефтегазоносных комплексов (С. В. Видик, П. В. Химченко, И. В. Осадчий) Волго-Уральской НГП; о развитии рифогенных отложений верхнего франа Николаевско-Городищенской предбортовой ступени Нижневолжской НГО (О. И. Смирнова, Е. П. Медведева, М. В. Смирнов, Е. В. Мелихова); о возможных закономерностях развития верхнедевонских карбонатных построек северной части Колвинского мегавала Тимано-

Печорской НГП (Т. И. Григоренко, С. В. Сенин, Т. В. Зимишина); о резервуарах нефти и газа в карбонатных породах рифея и кембрия в обрамлении юго-западной части Сибирской платформы (В. С. Парасына, Г. Д. Ухлова, М. А. Масленников, Е. В. Милованова, О. В. Гутина, А. В. Струнов, В. Г. Сибгатулин, Н. В. Прицан, Д. А. Горлов); о нижнекембрийских рифах Иркутской области (В. А. Ванин). И только два доклада были посвящены коллекторским свойствам пород верхней части атдабанского яруса нижнего кембрия северо-востока Непско-Ботуобинской антеклизы (В. А. Жемчугова, В. А. Лебедько, А. Е. Власов, А. Н. Фарзиева) и фаменских микробиальных органогенных построек Тимано-Печорской НГП (Р. Р. Нуриахметов, Е. Т. Казимиров). Выделялось на общем фоне сообщение Б. П. Богданова «Ненужные рифы Восточно-Европейской платформы» (соавторы Н. А. Бестужева, С. А. Горобец), в котором на основе огромного количества фактического материала докладчик доказывал наличие в пределах Восточно-Европейской платформы крупных протяженных зон рифообразования, сформировавшихся как в докемрии, так и в палеозое, и перспективность их опoискования.

Несмотря на то, что с органогенными постройками обычно связаны месторождения нефти и газа, рифогенные отложения часто могут содержать и иные полезные ископаемые. Эта тема была раскрыта в трех докладах. Е. Л. Петренко и Е. Ю. Малафеева в устном сообщении продемонстрировали литологические характеристики бокситоподобных пород из органогенных построек верхнего девона Хорейверской впадины Тимано-Печорской НГП. Я. Г. Аухатов в стендовом сообщении показал наличие элементарной серы в рифах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Т. В. Майдль совместно с М. С. Нечаевым выявили в карбонатных отложениях нижнего девона бассейна руч. Дэршор на гряде Чернышева проявление палеокарста и сульфидной минерализации.



Практические занятия были интересны не только молодым, но и маститым ученым. На фото слева направо: А. П. Вилесов (Группа компаний ГПН, Санкт-Петербург), К. Ю. Васильева (СПбГУ, Санкт-Петербург) и П. Путтхапибан (Махидольский университет, Бангкок, Таиланд). Фото А. В. Ерофеевского

The practical classes were interesting not only for young people, but also for experienced scientists.

From left to right: A. P. Vilesov (Gazprom Neft Group of Companies, St. Petersburg), K. Yu. Vasilieva (SPbSU, St. Petersburg), and P. Putthapiban (Mahidol University, Bangkok, Thailand). Photo by A. V. Erofeevsky



Нужно отметить, что во всех представленных докладах доказательная база была основана на представительном фактическом материале и репрезентативных аналитических данных, раскрывающих не только текстурно-структурные характеристики и вещественный состав органогенных построек, но и особенности их геохимии, минералогии и строения на самом тонком уровне. В ряде сообщений раскрывались вариации изотопно-геохимического состава углерода и кислорода карбонатов как в виде статистики (например, в докладе о нижнепермских известняках р. Уньи на Северном Урале О. С. Ветошкиной), так и в виде импирических закономерностей их взаимосвязи с глобальными геодинамическими перестройками раннего девона на территории Китабского национального заповедника (О. П. Изох, Д. В. Гражданкин) и влияния постседиментационных процессов на изотопно-геохимический состав древних микробиальных отложений Сибирской платформы (К. А. Тихонова). В докладе «Микробиальные обрастания фоссилий бентосных организмов и методы изучения» (Л. В. Леонова, Е. И. Сорока, А. А. Галеев) была показана методика распознавания и изучения придонных микробиотических образований.

Отдельным блоком среди всех представленных докладов выделяются доклады, в которых раскрываются вопросы образования карбонатов и органогенных построек на дне морских и пресноводных бассейнов в настоящее время. Так, М. Д. Кравчишина с большой группой соавторов показала разнообразие и особенности состава аутигенных карбонатов, образованных в зонах выхода холодных метановых сипов арктических морей Северной Евразии. И. Г. Добрецова продемонстрировала процессы литификации рыхлых биогенных карбонатных осадков, протекающие вследствие флюидных высачиваний на Срединном Атлантическом хребте. В. А. Шахвердов, В. Ф. Сапега и А. В. Брылина рассказали о первой находке элементной серы в поверхностных осадках гидратсодержащей структуры Р-2 (Песчанка) в Южной котловине озера Байкал. В. И. Лысенко раскрыл особенности строения и формирования уникальных геолого-биологических объектов пляжных бактериальных построек бухты Ласпи на Южном берегу Крыма и их связь с флюидами холодных сипов. Е. А. Глазырин рассказал о кольцевых ракушняковых образованиях подводных грязевых вулканов шельфа Керченско-Таманской грязевулканической области. А. В. Романова доложила о результатах проведенных с группой соавторов исследований раковин фораминифер из колонки LV 50-05, отобранной в зоне активного выхода метана на подводном склоне Северо-Восточного Сахалина в Охотском море, с целью выяснения характера их вторичной карбо-

натной минерализации на различных глубинах отбора.

В программу совещания была включена молодежная школа, на которой были заслушаны лекции Е. С. Пономаренко «Концепция карбонатных фабрик и вопросы их классификации», Т. В. Майдль «Основные эпигенетические процессы карбонатных резервуаров нижнепалеозойского комплекса Тимано-Печорской провинции», В. И. Ракина «Биогенные модели образования пирита в донных осадках». Продолжением темы «карбонатных фабрик» послужил доклад О. Ю. Мельничука «Современные карбонатные фабрики и климат: сопоставление ареалов». Эти лекции вызвали живой интерес у слушателей, вылились в продолжительные дискуссии и, несомненно, расширили кругозор в области теории литогенеза и биогенного минералообразования, практических знаний о постседиментационных изменениях карбонатных пород. На практических занятиях под руководством Н. А. Матвеевой молодые ученые смогли ознакомиться со шлифами и образцами горных пород верхнекаменноугольно-нижнепермских скелетных холмов Северного Урала, изучить породообразующие водоросли из данных отложений и совместно с А. Н. Сандулой и А. Н. Шадриным узнать особенности строения микробиальных образований в нижнекаменноугольных отложениях разреза «Уньинская пещера» (р. Унья, Северный Урал).

На заключительном заседании было дано много положительных отзывов об организации и работе совещания. Выступающими отмечались насыщенность программы и высокое качество сообщений, отражающих практически полный спектр вопросов изучения рифовых отложений. Были высказаны предложения о необходимости более широкого освещения современных методик и методов изучения карбонатных пород, расширения спектра их применения в проводимых исследованиях. В ходе дискуссии поднимались вопросы, связанные с терминологической неоднозначностью классификации и подходов в изучении микробиалитов, в связи с чем было озвучено пожелание провести литологический семинар, посвященный данным вопросам.

Участники и слушатели совещания выразили искреннюю благодарность оргкомитету и руководству Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН за теплый прием. Оргкомитет со своей стороны благодарит всех участников совещания, приехавших в Сыктывкар, выступивших с онлайн-докладами или приславших е-постеры, а также активно участвовавших в дискуссиях.

**ученый секретарь совещания
к. г.-м. н. А. Н. Сандула**

Редакторы издательства:

О. В. Габова, Г. Н. Каблис, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка:

Р. А. Шуктомов

Выпуска из реестра средств массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 31.07.2025. Формат бумаги 60 × 84 ¹/₈. Печать RISO. Усл. п. л. 6.5. Тираж 140. Заказ 1251. 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 редакции: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru
На обложке использованы фото Г. Каблиса, И. Голубевой, А. Журавлева, А. Шмырова, Н. Инкиной.