



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

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
А. В. Журавлев, Сыктывкар, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия
М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия
Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия
П. Мянник, Таллин, Эстония
А. И. Николаев, Апатиты, Россия
Б. М. Осовецкий, Пермь, Россия
Ю. Ф. Патраков, Кемерово, Россия
И. В. Пеков, Москва, Россия
В. Н. Пучков, Екатеринбург, Россия
Д. Ю. Пушаровский, Москва, Россия
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
Ш. Сан, Мянъян, Китай
К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США
О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия
М. А. Федонкин, Москва, Россия
А. Г. Шеломенцев, Сыктывкар, Россия

Технический редактор Г. Н. Каблис

Заведующий редакцией Т. А. Некучаева

Editorial Board

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. Voytekhovskiy, St. Petersburg, Russia
A. D. Gvishiani, Moscow, Russia
A. V. Zhuravlev, Syktyvkar, Russia
M. Komac, Ljubljana, Slovenia
S. V. Krivovichev, St. Petersburg, Russia
S. K. Kuznetsov, Syktyvkar, Russia
M. Martins, Ouro Preto, Brazil
T. P. Mayorova, Syktyvkar, Russia
P. Männik, Tallinn, Estonia
A. I. Nikolaev, Apatity, Russia
B. V. Osovetsky, Perm, Russia
Yu. F. Patrakov, Kemerovo, Russia
I. V. Pekov, Moscow, Russia
V. N. Puchkov, Yekaterinburg, Russia
D. Yu. Pushcharovskiy, 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, Syktyvkar, Russia

Technical Editor G. N. Kablis

Managing Editor T. A. Nekuchaeva

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2020) — 0.532

Журнал издается
под научно-методическим руководством
Отделения наук о Земле РАН



SCIENTIFIC JOURNAL

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

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Five-year RSCI
impact factor (2020) — 0.532

The journal is published under
the research and methodological guidance
of the RAS Department of Earth Sciences

Содержание

Content

Научные статьи

Scientific articles

Новые $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -данные долеритов Канино-Тиманской провинции внутриплитного магматизма (п-ов Канин) <i>А. М. Шмакова, К. В. Куликова, А. В. Травин, Л. И. Богатырев</i>3	New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data of dolerites of the Kanino-Timan province of intraplate magmatism (Kanin peninsula) <i>A. M. Shmakova, K. V. Kulikova, A. V. Travin, L. I. Bogatyrev</i>3
Минералого-геохимические особенности руд золото-кварц-сульфидного проявления Верхнелекелецкое на Полярном Урале (кряж Манитаньрд) <i>Т. П. Майорова, Л. И. Ефанова, Н. В. Сокерина</i> 10	Mineralogical and geochemical features of the ores of the Verkhnelekeletskeye gold-quartz-sulfide occurrence in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge) <i>T. P. Mayorova, L. I. Efanova, N. V. Sokerina</i> 10
Позднеледниково-голоценовая стратиграфия донных отложений из котловин малых изолированных озер баренцевоморского побережья (Кольский регион) <i>А. Н. Толстоброва, О. П. Корсакова, Д. С. Толстобров</i> 26	The late-glacial – Holocene stratigraphy of bottom sediments from small isolated lakes in the Barents Sea coast (Kola region) <i>A. N. Tolstobrova, O. P. Korsakova, D. S. Tolstobrov</i> 26
Кристаллохимические особенности обогащенного стронцием аквалитоподобного минерала из Кондерского массива <i>Р. К. Расцветева</i> 38	Crystal chemistry features of the Sr-rich aqualite-like mineral from the Konder alkaline complex <i>R. K. Rastsvetaeva</i> 38
Из опыта преподавания. XI. История и философия в курсах кристаллографии и минералогии <i>Ю. Л. Войтеховский</i> 44	From teaching experience. XI. History and philosophy at the crystallography and mineralogy courses <i>Yu. L. Voytekhovsky</i> 44

Хроника, события, факты. История науки

Chronicle, events, facts. History of Science

Граница живетского и франского ярусов девона (Научно-производственное совещание)..... 53	Devonian Givetian-Frasnian Boundary (Research and production meeting) 53
Настоящий геолог, талантливый преподаватель, замечательный человек (к 90-летию со дня рождения Льва Васильевича Махлаева) 55	A real geologist, a talented teacher, a wonderful person (Celebrating the 90th anniversary of the birth of Lev Vasilievich Makhlaev) 55

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 552 (470.111)

DOI: 10.19110/geov.2022.6.1

Новые $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -данные долеритов Канино-Тиманской провинции внутриплитного магматизма (п-ов Канин)

А. М. Шмакова^{1, 2}, К. В. Куликова¹, А. В. Травин³, Л. И. Богатырев²

¹Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, alex.sch92@yandex.ru; kvkulikova@geo.komisc.ru;

²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург, lbi260484@yandex.ru;

³Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, travin@igm.nsc.ru

Канино-Тиманский регион расположен на северо-востоке европейской части России и представляет собой западный край Тимано-Печорской плиты. В пределах данного региона в девонское время проходили процессы рифтогенеза, обусловленного влиянием мантийного плюма. В результате данных процессов сформировался канино-тиманский долеритовый комплекс, включающий в себя дайки долеритов и покровы базальтов. Возраст долеритов на территории полуострова Канин был получен в 70-х годах прошлого века с помощью К-Аг-метода. Полученные данные располагаются в широком диапазоне — от 378 до 288 млн лет. С целью уточнения времени формирования долеритового комплекса было проведено датирование плагиоклаза данных пород $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -методом. В результате исследований установлено, что долериты полуострова Канин характеризуются возрастом 419 ± 8 млн лет, тогда как по данным предшественников возраст базальтов Верхневорыквинского покрова на Среднем Тимане составляет 389 ± 6 млн лет. В результате исследований получены новые данные о возрасте канино-тиманского долеритового комплекса, которые позволили сделать вывод о том, что магматическая деятельность, приведшая к формированию исследуемого комплекса в Канино-Тиманском регионе, началась раньше на п-ове Канин, а затем уже на Тимане.

Ключевые слова: долериты, полуостров Канин, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст, мантийный плюм, Тиман.

New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data of dolerites of the Kanin-Timan province of intraplate magmatism (Kanin peninsula)

A. M. Shmakova^{1, 2}, K. V. Kulikova¹, A. V. Travin³, L. I. Bogatyrev²

¹Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar;

²VSEGEI, St. Petersburg;

³Institute of Geology and Mineralogy named after V. S. Sobolev SB RAS, Novosibirsk

The Kanin-Timan region is located in the north-east of the European part of Russia and represents the western edge of the Timan-Pechora Plate. In the Devonian time, the Kanin-Timan region experienced rifting processes caused by the influence of a mantle plume. As a result of these processes, the Kanin-Timan dolerite complex was formed, which includes dolerite dikes and basalt sheets. The rocks of the complex have been studied throughout the study region. In the Middle Timan, the basalt plagioclase of the Upper Vorykva cover was dated by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method, the dating result indicates an age of 389 ± 6 Ma. Dolerites of the Kanin-Timan complex were also dated by the K-Ar method in the last century. As a result of dating, conflicting data on the absolute age from 378 to 288 Ma were obtained. To clarify the age of dolerites, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating was carried out. According to the isotope age data, the dolerites of the Kanin Peninsula are 419 ± 8 Ma, the age of the basalts of the Upper Vorykva cover is 389 ± 6 Ma. Thus, the magmatic activity that led to the formation of the Kanin-Timan complex in the Kanin-Timan region began earlier on the Kanin Peninsula, and then on the Timan. According to the research results, we believe that the Kanin-Timan complex began its formation in the Early Devonian with the peak during the Middle and Late Devonian time.

Keywords: dolerites, Kanin Peninsula, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age, mantle plume, Timan.

В девонское время на территории Канино-Тиманского региона проходили процессы рифтогенеза, обусловленного влиянием мантийного плюма [8]. В результате данных процессов сформировался канино-тиманский долеритовый комплекс, который включает в себя дайки долеритов и покровы базальтов.

Породы комплекса установлены на всей территории исследуемого региона. На п-ове Канин больше распространены дайки долеритов и в меньшей степени покровы базальтов. В пределах Тиманского кряжа отмечаются большие площади базальтов, дайки долеритов встречаются реже. Возраст пород комплекса по поло-

Для цитирования: Шмакова А. М., Куликова К. В., Травин А. В., Богатырев Л. И. Новые $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -данные долеритов Канино-Тиманской провинции внутриплитного магматизма (п-ов Канин) // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 3–9. DOI: 10.19110/geov.2022.6.1.

For citation: Shmakova A. M., Kulikova K. V., Travin A. V., Bogatyrev L. I. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data of dolerites of the Kanin-Timan province of intraplate magmatism (Kanin peninsula). Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 3–9, doi: 10.19110/geov.2022.6.1.

жению базальтов в вулканогенно-осадочных породах нижнефранского отдела считается позднедевонским [1, 2, 4]. По данным некоторых исследователей, возраст отложений, вмещающих базальты, рассматривается как среднедевонский [7]. На Среднем Тимане был датирован плагиоклаз базальтов Верхневорыквинского покрова Ar^{40}/Ar^{39} -методом [10], результат датирования указывает на возраст 389 ± 6 млн лет. Долериты канино-тиманского комплекса также датировались К-Аг-методом в прошлом веке. В результате исследований были получены противоречивые данные абсолютного возраста от 378 до 288 млн лет. Установление возраста

долеритов может прояснить ситуацию со спорным возрастом канино-тиманского комплекса, подтвердить одновозрастность пород в пределах региона и соответственно их принадлежность к единому комплексу, а также позволит понять ход эволюции магматизма Канино-Тиманского региона в девонское время.

Методика исследований

Пробы были отобраны на п-ове Канин в ходе геолого-съемочных работ в составе Канинской партии ВСЕГЕИ. Минералогические и петрографические ис-

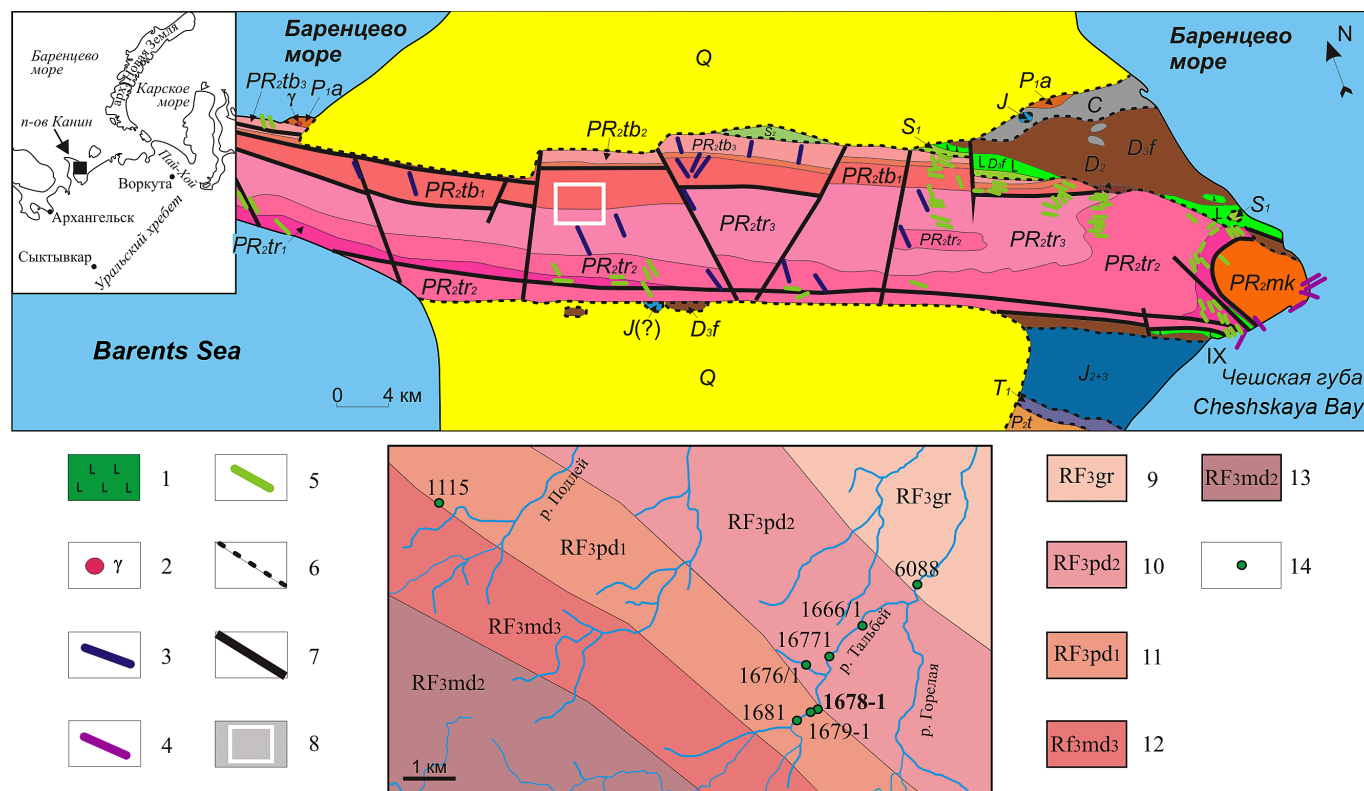


Рис. 1. Геологическая карта-схема полуострова Канин (по [1–3]):

1 – девонские базальты, 2 – граниты, 3 – дайки девонских долеритов, 4 – пегматиты, 5 – метадиабазы и амфиболиты, 6 – стратиграфические несогласия, 7 – разломы, 8 – участок района работ, 9 – горелоречья свита (RF₃gr), 10 – падлейская свита, верхняя подсвита (RF₃pd₂), 11 – падлейская свита, нижняя подсвита (RF₃pd₁), 12 – мадахинская свита, верхняя подсвита (RF₃md₃), 13 – мадахинская свита, средняя подсвита (RF₃md₂), 14 – точки отбора проб.

Отложения: Q – четвертичные, J – юрские; J₂₊₃ – средние и верхнеюрские; T₁ – нижнетриасовые; P₂t – верхнепермские, татарский ярус; P₁a – нижнепермские, ассельский ярус; C – каменноугольные; D₃f – верхнедевонские, франский ярус; D₂ – среднедевонские; S₂ – верхнесилурийские; S₁ – нижнесилурийские; PR₂ – верхнедокембрийские; PR₂mk – микулкинская серия: гнейсовидные алевропсаммиты и кристаллические сланцы, скарноиды; PR₂tr – тархановская серия: PR₂tr₁ – нижняя подсвита, кварцито-сланцевая, PR₂tr₂ – средняя подсвита, сланцевая, PR₂tr₃ – верхняя подсвита, сланцево-кварцитовая; PR₂tb – табуевская серия: PR₂tb₁ – свита ручья Болванского: песчаники, алевролиты и глинистые сланцы, PR₂tb₂ – янейская свита, PR₂tb₃ – гнильская свита: глинистые сланцы и филлиты, карбонатно-терригенные породы

Fig. 1. Geological map-scheme of the Kanin Peninsula (according to [1–3]):

1 – Devonian basalts, 2 – granites, 3 – Devonian dolerite dikes, 4 – pegmatites, 5 – metadiabases and amphibolites, 6 – stratigraphic unconformities, 7 – faults, 8 – area of material selection, 9 – Gorelaya Rechka Formation (RF₃gr), 10 – Upper part of the Padley Formation (RF₃pd₂), 11 – Lower part of the Padley Formation (RF₃pd₁), 12 – Upper part of the Madakha Formation (RF₃md₃), 13 – Middle part of the Madakha Formation (RF₃md₂), 14 – sampling points.

Deposits: Q – Quaternary, J – Jurassic; J₂₊₃ – Middle and Upper Jurassic; T₁ – Lower Triassic; P₂t – Upper Permian, Tatarian Series (approximately comparable); P₁a – Lower Permian, Asselian stage; C – coal; D₃f – Upper Devonian, Frasnian stage; D₂ – Middle Devonian; S₂ – Upper Silurian; S₁ – Lower Silurian; PR₂ – Upper Precambrian: PR₂mk – Mikulkin Superformation: gneiss-like silty-psammites and crystalline schists, skarnoids; PR₂tr – Tarkhan Superformation: PR₂tr₁ – Lower Formation, quartzite-shist, PR₂tr₂ – Middle Formation, shist, PR₂tr₃ – Upper Formation, shalequartzite; PR₂tb – Tabuev Superformation: PR₂tb₁ – Bolvansky Creek Formation: sandstones, siltstones and clayey shales, PR₂tb₂ – Yanei Formation, PR₂tb₃ – Gnil' Formation: clayey shales and phyllites, carbonate-terrigenous rocks



следования выполнялись в прозрачно-полированных шлифах и шашках в ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Для определения состава минералов использовался микрозондовый анализ, который проводился на спектральном электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с эдс X-MAX 50 mm Oxford Instruments (аналитики Е. М. Тропников, А. С. Шуйский). Содержания основных петрогенных элементов определялись рентгено-флуоресцентным анализом и классическим химическим методом; для определения концентрации элементов-примесей в породах использовался метод масс-спектропии с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7700 (ISP-MS) (аналитик Г. В. Игнатев). Исследования проведены в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Датирование пород осуществлялось $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -методом ступенчатого прогрева по плагиоклазу в Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева (Новосибирск, аналитик А. В. Травин).

Геология и петрография

На п-ове Канин исследуемый комплекс представлен дайками долеритов и покровами базальтов. Дайки долеритов секут рифейские сланцы и имеют преимущественно субмеридиональное простирание. Мощность от 2–10 до 50 м, протяженность от нескольких до первых десятков километров. Породы распространены в юго-восточной и центральной частях полуострова. Дайки установлены на реках Горелая, Тальбей, Падлей, Менсейяха, Мурсеяха (центральная часть полуострова) и в бассейне рек Б. Ойва и Немазямаяха (юго-восток полуострова). Покровы базальтов отмечаются на побережье Чешской губы. Породы комплекса имеют темно-серый, голубовато- или зеленовато-серый цвет.

Долериты имеют массивную, реже миндалекаменную, текстуру и офитовую, реже порфириковую, пойкилоофитовую микроструктуру. Миндалины небольшого размера, до 1 мм, имеют зональность. Они выполнены сидеритом, кальцитом и кварцем. Порфириновые вкрапленники встречаются очень редко (размер до 1.8 мм) и представлены лейстами плагиоклаза (битовнит). Основная масса представлена зональными ксеноморфными, реже гипидиоморфными, кри-

сталлами клинопироксена (размер 0.25–1.5 мм) и лейстами зонального плагиоклаза (размер 0.5–1.5 мм). По химическому составу плагиоклазы долеритов соответствуют лабрадору An_{50-69} , в единичных случаях битовниту An_{70-72} , по краям — низкокальциевому лабрадору An_{50-60} либо андезину An_{33-49} . Клинопироксены в центре зерна соответствуют преимущественно авгиту и магнезиальному пижониту, в единичных случаях — промежуточному пижониту и субкальциевому авгиту, по краям зерен — авгиту, ферроавгиту, реже субкальциевому ферроавгиту и железистому пижониту.

Рудные минералы представлены преимущественно гомогенными или скелетными кристаллами титаномагнетита со структурой распада или без нее (размер 0.5 мм, реже 1 мм). Реже встречается халькопирит, пирит, ильменит и галенит. Акцессорные минералы представлены апатитом и КПШ. Апатит встречается в виде скелетных изометричных или игольчатых кристаллов (размер 0.01–0.03 мм). КПШ формирует единичные зерна (размер до 0.1 мм). Межзерновое пространство выполнено стеклом, которое чаще всего замещено палагонитом [9].

Геохимия

Диапазон содержаний SiO_2 в породах п-ова Канин варьирует от 47.2 до 52.4 мас. %. Изученные долериты относятся преимущественно к породам нормальной щелочности ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 1.96\text{--}4.11$ мас. %).

Породы комплекса в большинстве случаев соответствуют магматическим образованиям натриевой серии (рис. 2, а), к калиево-натриево-натриевому типу относятся некоторые магматиты п-ова Канин ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.68\text{--}3.81$) [5]. По содержанию K_2O породы являются преимущественно умеренно калиевыми (рис. 2, б).

Долериты юго-восточной части п-ова Канин являются преимущественно низкоглиноземистыми $\text{al}' = 0.67\text{--}0.75$, кроме одного образца $\text{al}' = 0.79$. В центральной части п-ова Канин отмечаются умеренно глиноземистые $\text{al}' = 0.89\text{--}0.98$ и высокоглиноземистые $\text{al}' = 1.01\text{--}1.06$ породы (рис. 3) [6]. В долеритах из юго-восточной части п-ова Канин концентрации TiO_2

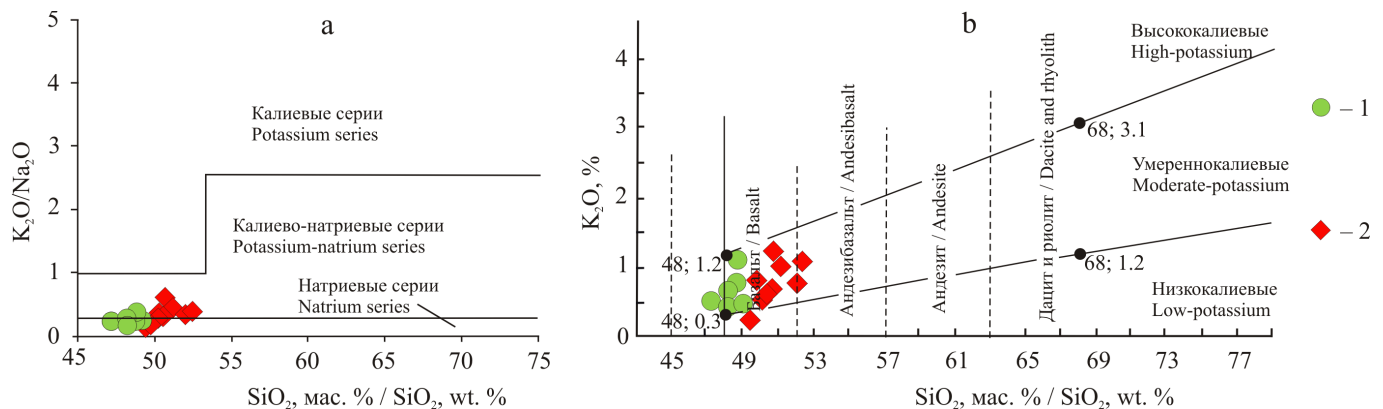


Рис. 2. а — график отношений $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$, б — график отношений $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ для девонских пород п-ова Канин [5]:

1 — породы юго-восточной части, 2 — породы центральной части

Fig. 2. а — diagram of $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ ratios, б — diagram of $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ ratios for Devonian rocks of the Kanin Peninsula [5]:

1 — rocks of the southeastern part, 2 — rocks of the central part

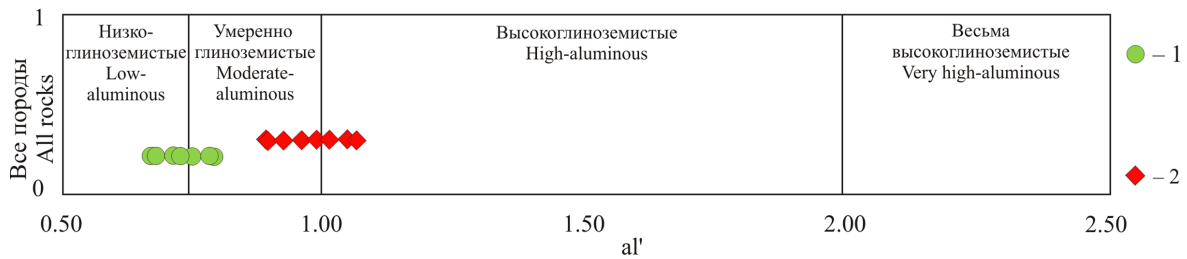


Рис. 3. Диаграмма для определения глиноземистости долеритов Канино-Тиманского региона. Условные обозначения см. на рис. 2. *Примечание:* $al' = Al_2O_3 / (FeO + Fe_2O_3 + MgO)$ [6]

Fig. 3. Diagram for determining the alumina content of dolerites in the Kanino-Timan region. Legend in Fig. 2. *Note:* $al' = Al_2O_3 / (FeO + Fe_2O_3 + MgO)$ [6]

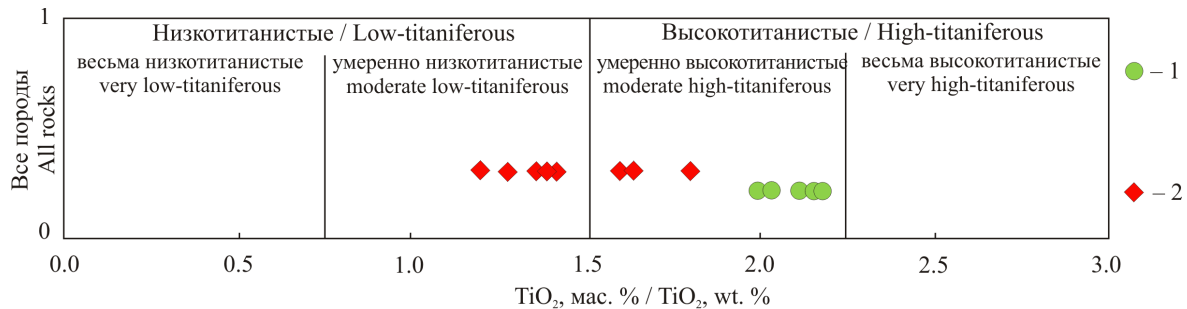


Рис. 4. Диаграмма для определения титанистости долеритов Канино-Тиманского региона. Условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 4. Diagram for determining the titanium content of dolerites of the Kanino-Timan region. Legend in Fig. 2

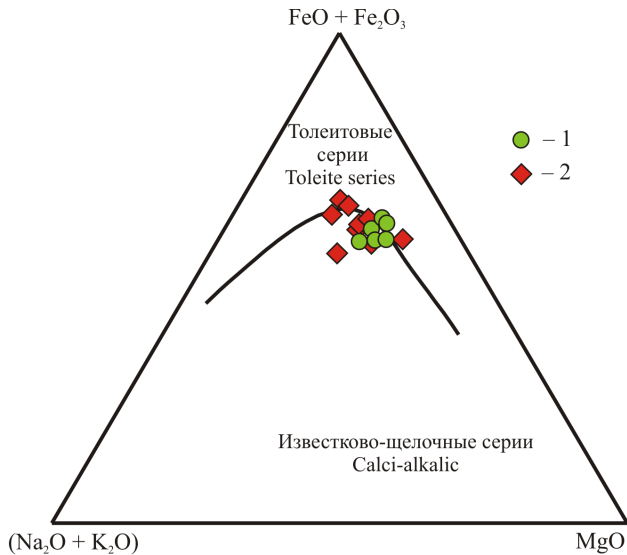


Рис. 5. Тройная дискриминационная диаграмма AFM [13]. Условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 5. Triple discrimination diagram AFM [13]. Legend in Fig. 2

составляют 2.0–2.2 мас. %, из центральной части полуострова — $TiO_2 = 1.20–1.80$ мас. % (рис. 4).

На диаграмме AFM составы девонских долеритов п-ова Канин попадают на толейтовый тренд (рис. 5).

Содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в породах канино-тиманского комплекса на полуострове Канин варьируют от 62.8 до 81.3 г/т (рис. 6). Наименьшие концентрации установлены в долеритах центральной

части п-ова Канин (36.5–56.8 г/т). Наибольшее содержание выявлено в долеритах центральной части п-ова Канин (81.3 г/т).

Результаты $^{40}Ar/^{39}Ar$ -датирования и выводы

По данным петрографии и геохимии, породы канино-тиманского комплекса как на п-ове Канин, так и на Тиманском кряже сходны [11]. Различие наблюдается в степени дифференциации.

На данный момент определен возраст только базальтов Среднего Тимана (Верхневорыквинский покров). Результаты $^{40}Ar/^{39}Ar$ -датирования по плагиоклазу свидетельствуют о возрасте 389 ± 6 млн лет [10]. Для уточнения возраста долеритов п-ова Канин было проведено $^{40}Ar/^{39}Ar$ -датирование (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Датирование проводилось методом ступенчатого нагрева монофракции плагиоклаза из долеритов пробы 1678/1 (р. Тальбей, п-ов Канин).

В спектре плагиоклаза (рис. 7) (табл. 1) выделяется кондиционное плато, характеризующееся значением возраста 419 ± 8 млн лет, $СКВО = 0.3$, включающее 95.9 % выделенного ^{39}Ar . Учитывая малоглубинные условия формирования пород и, соответственно, их быстрое охлаждение, можно считать полученную датировку оценкой времени их формирования.

Таким образом, в результате исследований установлено, что долериты полуострова Канин характеризуются возрастом 419 ± 8 млн лет, тогда как для базальтов Верхневорыквинского покрова был определен возраст 389 ± 6 млн лет [10]. На основании полученных

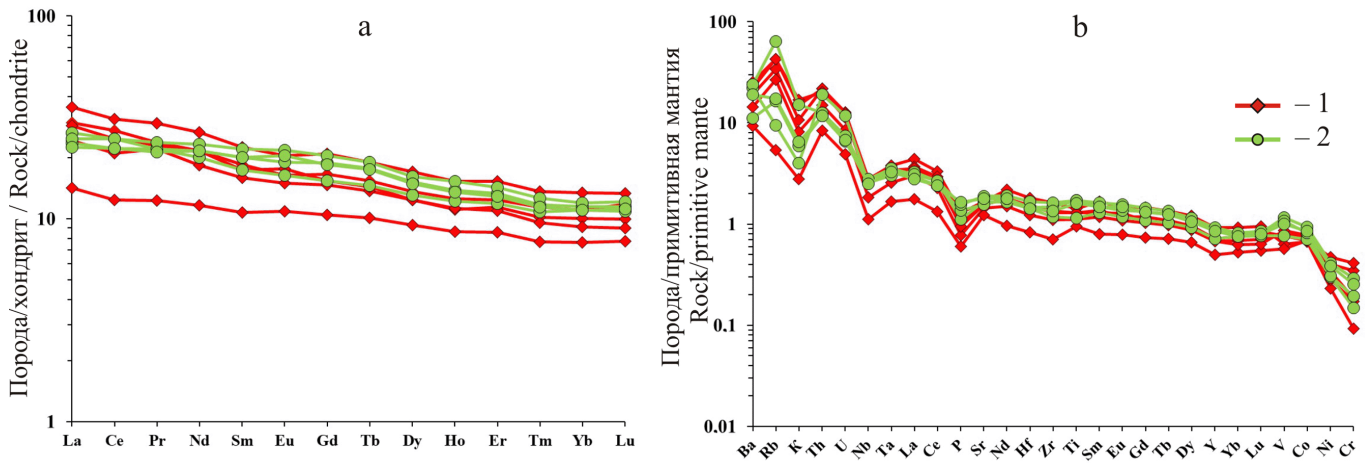


Рис. 6. а – график распределения REE, нормированных к составу хондрита C1 (по [12]) для девонских долеритов, б – спектры распределения элементов-примесей, нормированных к составу базальтов COX [14] для девонских долеритов. Условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 6. a – REE distribution plot normalized to the composition of chondrite C1 (according to: [12]) for Devonian dolerites, b – trace element distribution spectra normalized to the composition of MOR basalts [14] for Devonian dolerites. Legend in Fig. 2

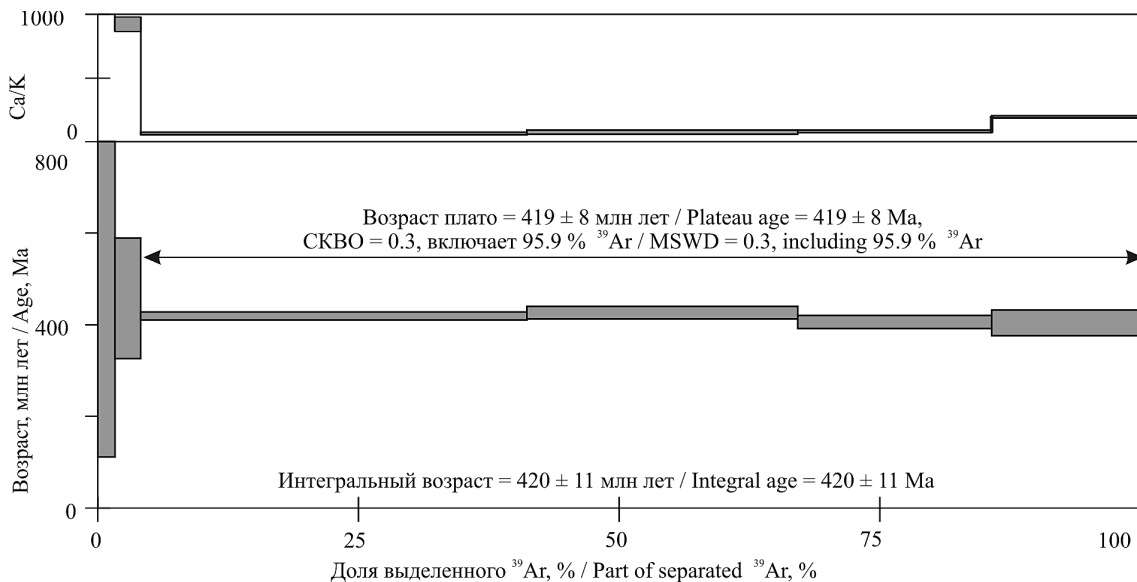


Рис. 7. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования мономинеральных фракций плагиоклаза из долеритов центральной части полуострова Канин

Fig. 7. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of plagioclase monomineral fractions from dolerites of the central part of the Kanin Peninsula

Таблица 1. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования

Table 1. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating results

T, °C	t, мин/мин	^{40}Ar , STP	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	Ca/K	$\Sigma^{39}\text{Ar}$, %	Возраст, млн лет $\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$
Образец 1678-1 плагиоклаз, навеска 99.57 мг, J = 0.005755 \pm 0.000086*; возраст промежуточного плато (950–1240 °C) = 419 \pm 8 млн лет, включает 95.9 % выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 420 \pm 11 млн лет														
Sample 1678-1 plagioclase, weight 99.57 mg, J = 0.005755 \pm 0.000086*; age of the intermediate plateau (950–1240 °C) = 419 \pm 8 Ma, includes 95.9 % of isolated ^{39}Ar ; integral age = 420 \pm 11 Ma														
550	10	3.7* e^{-9}	60.2	10.2	2.151	0.366	489.9	87.7	0.0117	0.1690	1763.6	1.6	510.0	398.0
675	10	6.1* e^{-9}	66.6	3.6	1.306	0.073	256.0	15.8	0.0550	0.0547	921.6	4.1	459.2	131.9
950	10	75.2* e^{-9}	54.5	0.2	0.084	0.002	15.1	1.0	0.0299	0.0028	54.4	41.2	420.7	8.8
1120	10	51.0* e^{-9}	52.7	0.3	0.136	0.001	23.7	1.4	0.0208	0.0050	85.4	67.1	427.9	13.6
1100	10	34.4* e^{-9}	49.7	0.3	0.130	0.001	21.1	1.5	0.0191	0.0053	76.1	85.7	407.5	14.2
1240	10	27.2* e^{-9}	51.2	0.6	0.235	0.010	54.0	2.4	0.0250	0.0111	194.4	100.0	405.6	28.0

* J – параметр, характеризующий величину нейтронного потока.

* J – parameter characterizing the magnitude of the neutron flux.

изотопных данных можно предположить, что магматическая деятельность, приведшая к формированию канино-тиманского комплекса в Канино-Тиманском регионе, началась раньше на п-ове Канин, а затем уже на Тимане. В результате исследований были получены новые данные о возрасте канино-тиманского долеритового комплекса. Таким образом, мы можем предположить, что канино-тиманский комплекс начал свое формирование в раннем девоне, а наиболее интенсивное его проявление приходится на средне- и позднедевонское время.

Изотопное датирование выполнено в рамках Государственного задания ИГМ СО РАН.

Литература

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-37, 38 — м. Святой Нос, м. Канин Нос. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 251 с. + 11 вкл. (Минприроды России, Роснедра, ФГУП «ВСЕГЕИ», ВНИИОкеангеология, ОАО «МАГЭ»).

2. Журавлев В. А., Куприн В. Ф., Лукьянова Л. И., Парамонова М. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Мезенская. Лист Q-38 — Мезень. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 311 с. + 3 вкл.

3. Оловянишников В. Г. Геологическое развитие Северного Тимана и п-ова Канин. Сыктывкар: Геопринт, 2004. 80 с. Ил. 52, табл. 116.

4. Пармузин Н. М., Мазуркевич К. Н., Семенова Л. Р., Коссовая О. Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Мезенская. Лист Q-39 — Нарьян-Мар. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 393 с. + 32 вкл.

5. Петрографический кодекс России: Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / Под ред. О. А. Богатикова, О. В. Петрова, А. Ф. Морозова; отв. ред. Л. В. Шарпенюк. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.

6. Практическая петрология: методические рекомендации по изучению магматических образований применительно к задачам госгеолкарт. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. 168 с.

7. Проблемы геологии и минералогии / Отв. ред. А. М. Пыстин. Сыктывкар: Геопринт, 2006. 448 с. ISBN 5-98491-018-7.

8. Степаненко В. И. Канино-Тимано-Печорская провинция позднедевонского внутриплитного магматизма (положение и размеры) // Доклады академии наук. 2016. Т. 467. № 5. С. 572–575.

9. Шмакова А. М., Куликова К. В. Петрография и минералогия позднедевонских долеритов центральной и юго-восточной частей полуострова Канин // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2020. № 6 (46). С. 40–48. DOI 10.19110/1994-5655-2020-6-40-48

10. Удорткина О. В., Андреев В. Л., Травин А. В., Саватенков В. М. Базальты Среднего Тимана: Rb-Sr, Sm-Nd, и Ar-Ar-данные // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI Геологического съезда Республики Коми. Т. II. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. 384 с.

11. Шмакова А. М., Куликова К. В. Геохимическая характеристика позднедевонских базальтоидов полуострова Канин и Среднего Тимана // Известия Коми научного центра УрО РАН. Серия «Науки о Земле». № 3(49). Сыктывкар, 2021. С. 22–31. DOI: 10.19110/1994-5655-2021-3-22-31

12. Boynton W. V. Geochemistry of Rare Earth Elements Meteorite Studies // Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam, 1984. P. 63–114.

13. Irvine T. N., Baragar W. R. A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // Canad. J. Earth Sci. 1971. Vol. 8. P. 523–548.

14. Pearce J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries / Ed. R.S.Thorpe // Andesites. Wiley, Chichester, 1982. P. 525–548.

References

1. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Severo-KarskoBarentsevomorskaya. List R-37, 38. m. Svyatoy Nos, m. Kanin Nos. Obyasnitelnaya zapiska (State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Series North Kara–Barents Sea. Sheet R-37, 38. m. Holy Nose, m. Kanin Nos. Explanatory note). St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2008, 251 p.

2. V. A. Zhuravlev, V. F. Kuprin, L. I. Luk'yanova, M. S. Paramonova, et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Mezenskaya. List Q-38 — Mezen'. Obyasnitelnaya zapiska (State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Mezenskaya series. Sheet Q-38 — Mezen. Explanatory note). St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2012, 311 p.

3. Olovyaniishnikov V. G. Geologicheskoye razvitiye Severnogo Timana i p-ova Kanin (Geological development of the Northern Timan and the Kanin Peninsula). Syktyvkar: Geoprint, 2004, 80 p.

4. Parmuzin N. M., Mazurkevich K. N., Semenova L. R., Kossovaya O. L. etc. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Mezenskaya. List Q-39 — Nar'yan-Mar. Obyasnitelnaya zapiska (State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Mezenskaya series. Sheet Q-39 — Naryan-Mar. Explanatory note). St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2015, 393 p.

5. Petrograficheskiy kodeks Rossii: Magmaticheskiye, metamorficheskiye, metasomaticheskiye, impaktnyye obrazovaniya (Petrographic Code of Russia: Igneous, Metamorphic, Metasomatic, Impact Formations). Eds. O. A. Bogatikova, O. V. Petrova, A. F. Morozov; resp. ed. L. V. Sharpenok, 3rd ed., Rev. and additional. St. Petersburg: VSEGEI, 2009, 200 p.

6. Prakticheskaya petrologiya: metodicheskiye rekomendatsii po izucheniyu magmaticheskikh obrazovaniy primenitel'no k zadacham gosgeolkart (Practical petrology: guidelines for the study of igneous formations in relation to the tasks of state geolmaps). St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2017, 168 p.

7. Problemy geologii i mineralogii (Problems of geology and mineralogy). Ed. A. M. Pystin, Syktyvkar: Geoprint, 2006, 448 p.

8. Stepanenko V. I. Kanino-Timano-Pechorskaya provintsiya pozdneдевонского vnutriplitnogo magmatizma (polozheniye i razmery) (Kanino-Timan-Pechora province of Late Devonian within-plate magmatism (position and size)). Doklady Earth Sciences, 2016, V. 467, No. 5, pp. 572–575.

9. Shmakova A. M., Kulikova K. V. Petrografiya i mineralogiya pozdneдевонских doleritov tsentral'noy i yugo-vostochnoy chasti



poluostrova Kanin (Petrography and mineralogy of Late Devonian dolerites in the central and southeastern part of the Kanin Peninsula). Proceedings of Komi SC UB RAS, 2020, No. 6 (46), pp. 40–48. DOI 10.19110/1994-5655-2020-6-40-48

10. Udoratina O. V., Andreichev V. L., Travin A. V., Savatenkov V. M. *Bazal'ty Srednego Timana: Rb-Sr, Sm-Nd, i Ar-Ar dannyye. Geologiya i mineral'nyye resursy Yevropeyskogo Severo-Vostoka Rossii* (Basalts of the Middle Timan: Rb-Sr, Sm-Nd, and Ar-Ar data. Geology and Mineral Resources of the European North-East of Russia). Proceedings of the 16th Geological Congress of the Komi Republic. V. 2, Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2014, 384 p.

11. Shmakova A. M., Kulikova K. V. *Geokhimicheskaya kharakteristika pozdne-devonskikh bazal'toidov poluostrova Kanin*

i Srednego Timana (Geochemical characteristics of the Late Devonian basaltoids of the Kanin Peninsula and the Middle Timan). Proceedings of Komi SC UB RAS. Earth Sciences series, No. 3 (49), Syktyvkar, 2021, pp. 22–31.

12. Boynton W. V. *Geochemistry of Rare Earth Elements Meteorite Studies. Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam, 1984, pp. 63–114.

13. Irvine T. N., Baragar W. R. A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canad. J. Earth Sci.*, 1971, V. 8, pp. 523–548.

14. Pearce J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. Ed. R. S. Thorpe. *Andesites*. Wiley, Chichester, 1982, pp. 525–548.

Received / Поступила в редакцию 23.05.2022



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.283:553.411.071

DOI: 10.19110/geov.2022.6.2

Минералого-геохимические особенности руд золото-кварц-сульфидного проявления Верхнелекелецкое на Полярном Урале (кряж Манитанырд)

Т. П. Майорова^{1, 2}, Л. И. Ефанова¹, Н. В. Сокерина¹¹Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, *gmin2004@mail.ru, sokerina@geo.komisc.ru*²Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, *mayorova@geo.komisc.ru*

Золоторудное проявление Верхнелекелецкое золото-кварц-сульфидного типа локализуется в краевой части дайки габбро-долеритов леквожского комплекса нижнего ордовика. Рудная зона сложена пирит-серицит-кварцевыми метасоматитами с кварцево-жильной и прожилково-вкрапленной минерализацией. Золотосульфидные руды представлены пиритом с подчиненным количеством арсенопирита и в меньшей степени сфалерита. Галенит и халькопирит присутствуют в виде микровключений в пирите и арсенопирите. Характерными элементами-примесями в сульфидах являются мышьяк и сурьма, встречается никель. Установлены редкие минералы – тетраэдрит, сульфосоли свинца, ульманнит, герсдорфит. Основная форма нахождения золота – субмикронные и микронные выделения в пирите и арсенопирите. Элементы-примеси в золоте – серебро, редко встречается ртуть. Золото умеренно высокопробное и средней пробы, в присутствии ртути низкопробное. По минеральному составу руд, включая редкие минералы, рудопоявление Верхнелекелецкое имеет большую степень сходства с месторождением Верхненийуское-2. Сульфиды проявления Верхнелекелецкое характеризуются легким изотопным составом серы ($\delta^{34}\text{S} = -0.2 \div -3.5 \text{ ‰}$), близким к метеоритному стандарту, что свидетельствует об участии в рудообразовании глубинных источников серы и связи проявления с магматическими процессами.

Ключевые слова: золото, рудопоявления, пирит-арсенопиритовый тип, изотопный состав серы, Нияуская рудная зона, кряж Манитанырд, Полярный Урал.

Mineralogical and geochemical features of the ores of the Verkhnelekeletskeye gold-quartz-sulfide occurrence in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge)

Т. П. Mayorova^{1, 2}, L. I. Efanova¹, N. V. Sokerina¹¹Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar,²P. Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Syktyvkar

The Verkhnelekeletskeye gold occurrence of gold-quartz-sulfide type is localized in the marginal part of the gabbro-dolerite dike of the Lower Ordovician Lekvozhsky complex. The ore zone is composed of pyrite-sericite-quartz metasomatites with quartz-vein and vein-disseminated mineralization. The gold-sulfide ores are represented by pyrite with a subordinate amount of arsenopyrite and, to a lesser extent, sphalerite. Galena and chalcopyrite are present as microinclusions in pyrite and arsenopyrite. Characteristic impurity elements in sulfides are arsenic and antimony, nickel is also found. We identified rare minerals – tetrahedrite, lead sulphosalts, ulmannite, gersdorffite. The main form of gold occurrence is submicron and micron segregations in pyrite and arsenopyrite. Impurity elements in gold are silver, mercury is rare. Gold is moderately high-grade and medium-grade, in the presence of mercury – low-grade. In terms of the mineral composition of ores, including rare minerals, the Verkhnelekeletskeye ore occurrence is very similar to the Verkhneniyayuskoye 2 deposit. The sulfides of the Verkhnelekeletskeye occurrence are characterized by a light sulfur isotopic composition ($\delta^{34}\text{S} = -0.2 \div -3.5 \text{ ‰}$), close to the meteorite standard, which indicates the participation of deep sulphur sources in ore formation and its association with magmatic processes.

Keywords: gold, ore occurrences, pyrite-arsenopyrite type, sulphur isotopic composition, Niyayu ore zone, Manitanyrd ridge, Polar Urals.

Введение

В Тимано-Североуральской золотоносной провинции наиболее перспективным на данный момент является Манитанырдский золоторудно-россыпной

район на Полярном Урале, в пределах которого расположено золотосульфидное месторождение с оцененными запасами золота, мышьяка, серебра, висмута, многочисленные проявления коренного золота

Для цитирования: Майорова Т. П., Ефанова Л. И., Сокерина Н. В. Минералого-геохимические особенности руд золото-кварц-сульфидного проявления Верхнелекелецкое на Полярном Урале (кряж Манитанырд) // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 10–25. DOI: 10.19110/geov.2022.6.2.

For citation: Mayorova T. P., Efanova L. I., Sokerina N. V. Mineralogical and geochemical features of the ores of the Verkhnelekeletskeye gold-quartz-sulfide occurrence in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge). Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 10–25, doi: 10.19110/geov.2022.6.2.



и пункты минерализации, а также небольшая россыпь [6]. Золотоносный потенциал этого района оценен не в полной мере. Наиболее хорошо изучено мелкое по запасам месторождение Верхнеияюское-2 и проявление Нияхойское-2. На месторождении Верхнеияюское-2 установлен состав метасоматитов, детально изучена минералогия руд, включая редкие минералы, и самородное золото, определены условия и последовательность рудообразования, источники рудного вещества, предложены модели формирования месторождения [1, 5, 7, 11, 12]. На рудопроявлении Нияхойское-2 проведено детальное изучение вещественного состава руд, установлены типоморфные особенности сульфидов и самородного золота, последовательность минералообразования и некоторые параметры рудного процесса, источники рудного вещества [8, 9]. В тоже время ряд перспективных рудопроявлений остаются слабо или недостаточно изученными. К таковым, в частности, относится проявление Верхнелекелецкое, расположенное на юго-западном замыкании Нияюской рудной зоны [6]. По данным предшественников, проводивших поисковые и ревизионные работы на золото в период 1963—1988 годы, проявление Верхнелекелецкое отнесено к жильной золото-кварц-сульфидной (золотомышьяковой) формации с пирит-арсенопиритовым типом руд, аналогичных таковым на месторождении Верхнеияюское-2 и проявлении Нияхойское-2 [2]. Содержания элементов в руде, по данным атомно-абсорбционного анализа, составили (%): Zn — 0.18, Pb — 0.7, Cu — 0.02, Hg — 0.0005. Максимальные содержания: Au — 3.3 г/т, Ag — 18 г/т. Детальные минералогические исследования руд не проводились, форма нахождения золота в рудах оставалась неизвестной, генетические аспекты и связь с процессами рудообразования в районе не рассмотрены, дальнейшие перспективы рудопроявления не ясны. Нами получены первые данные о минеральном составе и геохимических особенностях руд проявления Верхнелекелецкое, типоморфных признаках рудных минералов и золота, источниках рудного вещества и связи с процессом рудообразования в Манитаньрдском золоторудном районе.

Геологическое строение района и рудопроявления Верхнелекелецкое

В структуре Полярного Урала кряж Манитаньрд занимает место в Западно-Уральской складчатой зоне и представляет собой автохтон в виде антиклинория, сложно построенной антиклинальной складки, ориентированной в северо-восточном направлении и опрокинутой на северо-запад с падением осевых плоскостей на юго-восток с углами 60—75° [3]. Ядро антиклинали сложено верхнерифейскими и вендскими породами бедамельской серии и энганепэйской свиты, крылья — венд-кембрийскими отложениями манитаньрдской серии (рис. 1).

Породы бедамельской серии (RF₃-V₂bd) представлены лавами и туфами базальтов, андезитами, дацитами и риолитами общей мощностью 2000—2700 м. Энганепэйская свита (V₂-E₁en) характеризуется грубым переслаиванием туфопесчаников, туфоконгломератов мощностью 1200—1500 м. На размытой поверхности докембрийских пород с угловым несогласием

залегает отложения манитаньрдской серии (E-O₁mnt) — конгломераты, гравелиты, кварцитопесчаники, алевролиты мощностью 500—800 м.

Интрузивные породы в Манитаньрдском районе развиты незначительно (рис. 1). Отмечаются немногочисленные небольшие тела габбро и габбро-долеритов, которые относятся к экструзивно-субвулканическому комплексу нижней части бедамельской серии позднего рифея — венда, а также гранитов и гранодиоритов позднерифейского нияюского комплекса. Наиболее широко распространены интрузии и дайки габбро и габбро-долеритов леквожского комплекса раннего ордовика, ориентированные в северо-восточном направлении и прорывающие породы бедамельской серии и энганепэйской свиты. Все породы района подверглись региональному метаморфизму зеленосланцевой фации.

Для центральной части района характерны крупные разрывные нарушения преимущественно север-северо-восточного простирания. К ним приурочены тела габбро и габбро-долеритов, зоны интенсивного расланцевания и дробления пород, их метасоматические изменения (серцитизация, хлоритизация, эпидотизация).

Золотосульфидно-кварцевые и золотосульфидные проявления Манитаньрдского района располагаются цепочкой вдоль Нияюской рудной зоны — линейно вытянутой тектонической структуры северо-восточного простирания (рис. 1). Месторождение Верхнеияюское-2 локализуется в вулканиках бедамельской серии, все остальные рудопроявления — в вулканогенно-терригенных породах энганепэйской свиты.

Рудопроявление Верхнелекелецкое расположено в юго-западной части Нияюской рудной зоны, в истоках р. Лек-Елец (рис. 1; 2, а). Оно локализуется в краевой части дайки долеритов мощностью от 4 до 6 м. По данным предшественников долериты отнесены к леквожскому комплексу нижнего ордовика (рис. 2, а). Рудная зона представляет собой полосу метасоматитов переменной мощности (0.5—2 м), параллельную контакту дайки, с вкрапленной сульфидной минерализацией, четковидной кварцевой жилой и многочисленными прожилками, также содержащими сульфидную (золото-арсенопирит-пиритовую) минерализацию. Породы дайки и рудной зоны разбиты густой сетью трещин. Кварцевая жила имеет максимальную мощность 40 см и протяженность около 5 м. Руды массивные и густо вкрапленные (рис. 2, б).

Рудопроявление было открыто в 1983 г. Н. И. Хорошкевым по результатам металлометрической и золотометрической съемок, проведенных в 1963—1964 гг. и выявивших на этой площади аномальные содержания мышьяка и золота. В траншее-расчистке № 1540, заложенной в краевой части дайки габбро-долеритов, была вскрыта четковидная кварц-пирит-арсенопиритовая жила с максимальными содержаниями золота — 3.3 г/т, серебра — 18 г/т (рис. 2, б) и сопутствующих элементов (%): Pb — до 0.7, Cu — до 0.02, Hg — до 0.5—3.0. В массивных и густо вкрапленных пиритовых рудах без кварца содержание золота падает до 0.1—0.45 г/т и до 0.05 г/т в самих габбро-долеритах. В 1988 г. А. М. Чулаевским на рудопроявлении выявлена наиболее яркая аномалия (№ 100) площадью 0.578 км², в которой содержания Au, As, Bi, Cu, Mo, Co достигают

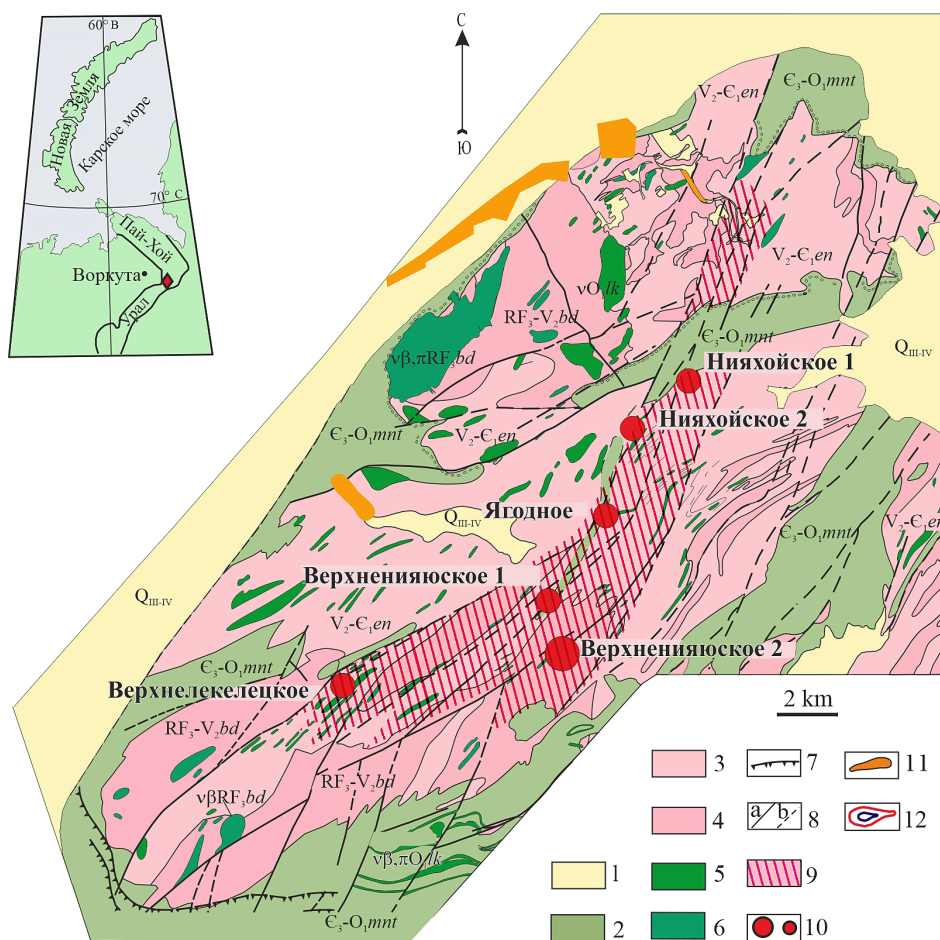


Рис. 1. Геологическое строение района и золоторудные проявления Манитанырдского района (с дополнениями и изменениями [3]):

1 — четвертичные отложения; 2 — манитанырдская серия нерасчлененная (верхний кембрий — нижний ордовик); 3 — энганепейская свита (верхний венд — нижний кембрий); 4 — бедамельская серия нерасчлененная (верхний рифей — венд). Интрузии: 5 — леквожский комплекс: оливиновые габбро и долериты, пикродолериты; 6 — нижнебедамельский комплекс: габбро, габбро-долериты; 7 — тектонические покровы; 8 — разрывные нарушения: а — достоверные, б — предполагаемые; 9 — Нияйская рудная зона; 10 — золоторудные месторождения (а) и проявления (б); 11 — россыпные проявления золота; 12 — моноэлементные аномалии золота и свинца

Fig. 1. Geological structure of the region and gold ore occurrences of the Manitanyrd region (with additions and changes, [3]).

1 — Quaternary deposits; 2 — undivided Manitanyrd series (Upper Cambrian — Lower Ordovician); 3 — Enganepe formation (Upper Vendian — Lower Cambrian); 4 — undivided Bedamel series (Upper Riphean — Vendian). Intrusions: 5 — Lekvozhsky complex: olivine gabbro and dolerites, picrodolerites; 6 — Nizhnebedamel complex: gabbro, gabbrodolerites; 7 — tectonic covers; 8 — disjunctive dislocations: a — reliable, b — probable; 9 — Niyayu ore zone. 10 — gold deposits (a) and occurrences (b); 11 — alluvial occurrences of gold. 12 — monoelement anomalies of gold and lead

рудогенного уровня. Размах содержаний в контуре аномалий золота (в $n \cdot 10^{-3}$ г/т) — 2—250 при среднем содержании 17 и местном геохимическом фоне 1.

Макроскопически строение рудной зоны характеризуется брекчиевидной текстурой. В брекчии выделяются обломки удлиненно-угловатой формы светло-зеленого цвета с мелкопятнистой текстурой и четкими границами, насыщенные тонкой вкрапленностью пирита, и овальной формы серого цвета, в которых также отмечается рассеянная вкрапленность пирита (рис. 3).

Кварцевые прожилки с густо вкрапленной рудной минерализацией тяготеют к границам обломков, реже секут их, утыкаясь при этом в границы соседнего обломка (рис. 3, d). В пределах штупа они образуют ко-

ротки (от 2 до 10 см) субпараллельные или разноориентированные (иногда линзовидные) прожилки толщиной от 2—8 мм до 1.5—2.0 см (рис. 3, с, d). Границы прожилков часто также субпараллельны (рис. 3, с). Кварц серый, в более крупных прожилках в центральной части отмечаются участки светло-серого кварца. Тонкие прожилки почти полностью сложены рудными минералами с подчиненным количеством кварца, в более толстых прожилках рудная минерализация тяготеет к зальбандам. Кварцевые прожилки с обильной рудной минерализацией являются, по-видимому, самими поздними, поскольку выполняют трещины между обломками в брекчии и утыкаются в границы обломков. Сама рудная брекчия, скорее всего, имеет тектоническое происхождение.

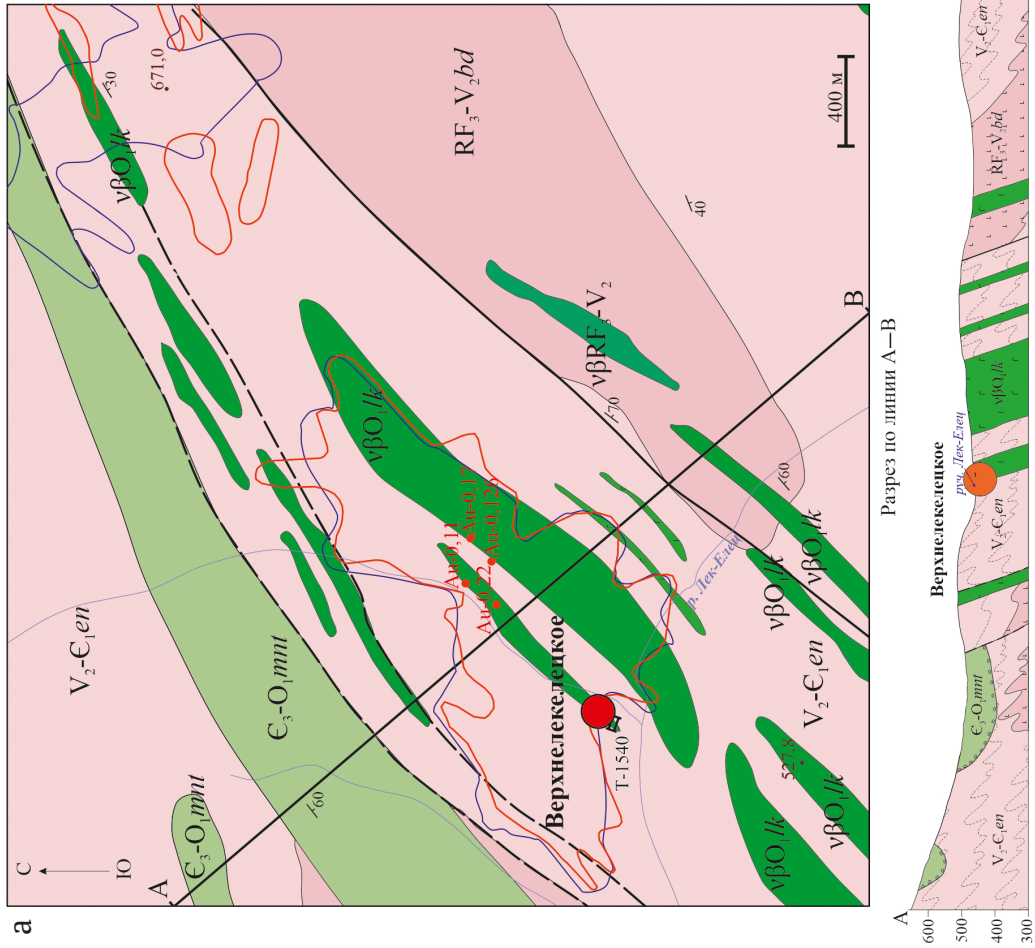


Рис. 2. Схематическая геологическая карта рудопроявления Верхнелекетское, комплекс аномалий, сопутствующих золоту (а — с изменениями по А. М. Чулаевскому, 1988 г); золото-кварц-сульфидная жила в метадолеритах леквозжского комплекса, траншея 1540 (б — по Н. И. Хорошкеву, 1983 г). Условные обозначения см. на рис. 1

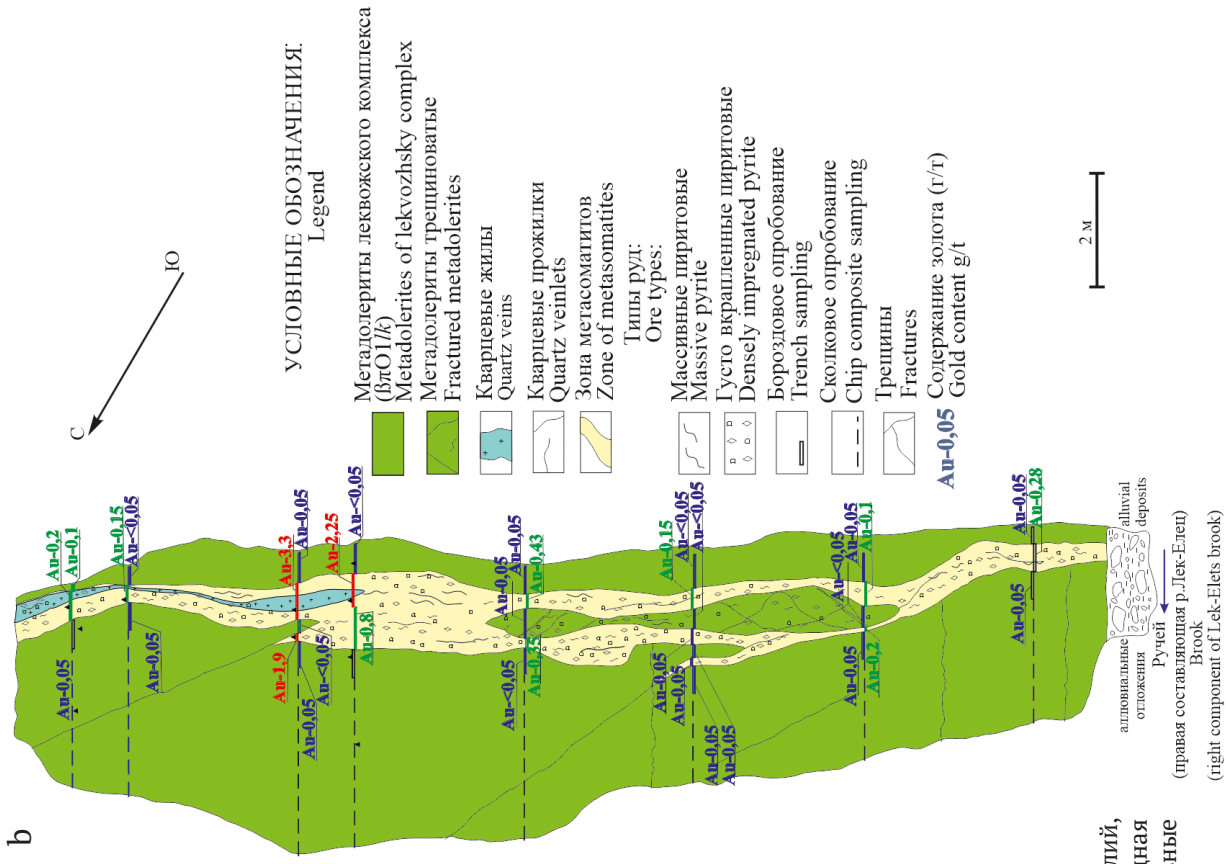


Fig. 2. Schematic geological map of the Verkhneleketzskoye ore occurrence, gold-associated anomalies (a); gold-quartz-sulfide vein in metadolерites of the Lekvozhsy complex, trench 1540 (b). See the legend in Fig. 1

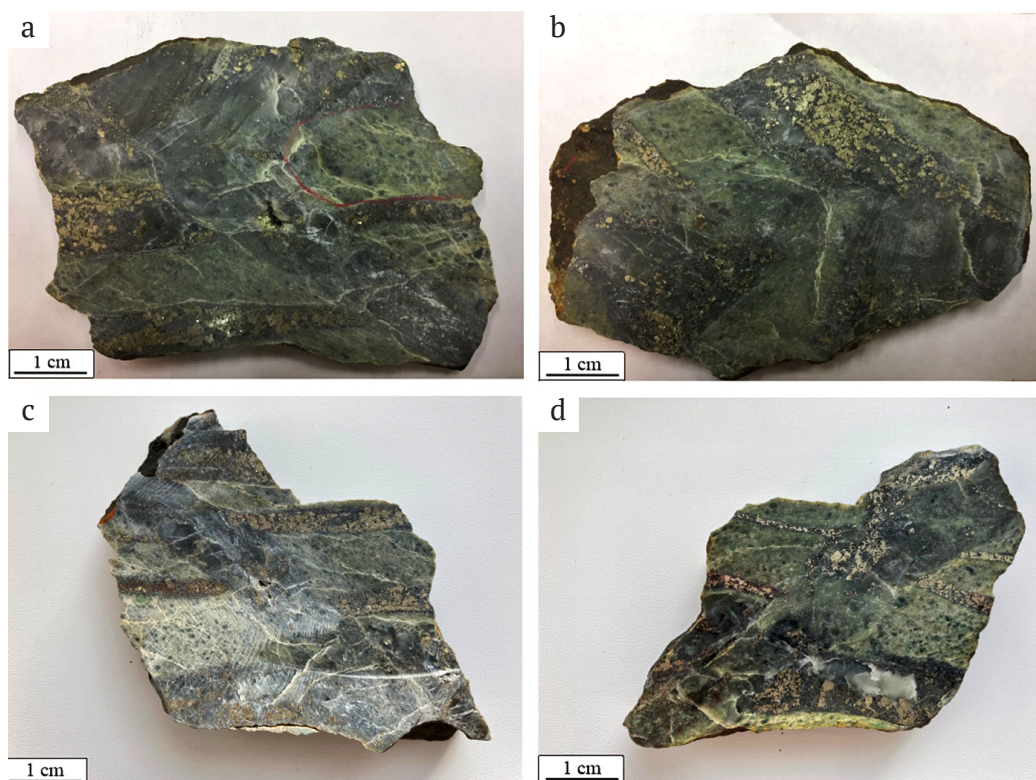


Рис. 3. Брекчиевидная макротекстура руды, распределение кварц-сульфидных прожилков

Fig. 3. Brecciated macrotexture of the ore, distribution of quartz-sulfide veinlets

Материал и методы

Материалом для исследования послужил штуф руды с проявлениями Верхнелекеецкое из коллекций Л. И. Ефановой. Для изучения состава рудовмещающих пород и руд были изготовлены шлифы и аншлифы. Петрографические и минералогические исследования проводились в ЦКП «Наука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Микроскопическое описание шлифов выполнялось на оптическом микроскопе Nikon Eclipse LV 100 ND. Текстуры, структуры руд и состав рудных минералов определялся в аншлифах на сканирующем электронном микроскопе «TescanVega» 3 LMN (Tescan, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 (Oxford Instruments, Oxford, UK) (операторы Е. М. Тропников, А. С. Шуйский). Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 15 нА, диаметре пучка до 1 мкм и времени на регистрацию спектров 600 тыс. импульсов. Для визуализации распределения примеси As в пирите небольшая часть анализов и BSE-изображения выполнены на сканирующем электронном микроскопе ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM с энергодисперсионной приставкой TrueSight EDS 25 mm² (оператор В. А. Радаев). Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 0.85 мкА, размере пучка 180 нм и области возбуждения до 5 мкм с использованием программного обеспечения xT SEM.

Анализ элементов-примесей в пирите проводился в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург): на Au — методом атомно-абсорбционной спектроскопии, на Co, Ni, Cu, Zn, Ge, Se, Mo, Ag, Sb, Te, Pb, Bi, As — методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Пределы обнаруже-

ния (ppm): Co (0.5), Ni (1.0), Cu (1.0), Zn (1.0), Ge (0.1), Se (0.1), Mo (0.6), Ag (0.01), Sb (0.1), Te (0.2), Pb (1.0), Bi (0.1), As (0.5); Au — 0.002 г/т.

Изотопный анализ серы выполнен в лаборатории стабильных изотопов ЦКП ДВГИ ДВО РАН (Владивосток). Изотопный состав серы пирита определялся на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ThermoFinnigan, Bremen, Germany) с использованием двойной системы напуска по методике В. А. Гриненко [4]. Анализировались мономинеральные пробы пирита массой 10 мг. Соотношение изотопов серы представлено относительно международного стандарта VCDT. Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа серы арсенопирита проведена локальным лазерным методом с использованием фемтосекундного комплекса лазерной абляции NWR Femto [13, 15]. Соотношение изотопов серы измеряли на массах 127 (³²SF⁵⁺) и 129 (³⁴SF⁵⁺) на масс-спектрометре MAT-253 (Thermo Fisher Scientific, Germany). Измерения проведены относительно лабораторного рабочего стандарта, калиброванного по международным стандартам IAEA-S-1, IAEA-S-2 и IAEA-S-3. Результаты измерений $\delta^{34}\text{S}$ обоими методами приведены относительно международного стандарта VCDT и выражены в промилле (‰). Точность анализов $\delta^{34}\text{S}$ составляла ± 0.20 ‰ (2 σ).

Рудовмещающие породы

Вмещающая рудную минерализацию порода представляет собой *кварц-биотитсодержащий порфировидный метадолерит*, мелкозернистый, с реликтовой габброфитовой или офитовой структурой (шлиф 1144-1). Порода утратила первичный минеральный состав и со-



стоит из нацело измененного плагиоклаза (55–65 %), амфиболитизированного клинопироксена (30–40 %) с небольшим количеством хлоритизированного биотита (2–3 %) и ксеноморфного кварца (2–3 %). Акцессорные минералы — апатит, циркон, сульфиды. Вторичные минералы представлены альбитом, серицитом, соссюритом, амфиболом, хлоритом, титанитом, лейкоксеном.

Плагиоклаз присутствует в виде редких таблитчатых зерен размером 1.5–2 мм или беспорядочно ориентированных табличек размером 0.4–1 мм, нацело альбитизирован, серицитизирован и соссюритизирован. Альбит с двойниковым полисинтетическим строением содержит тонкозернистый эпидот и тонкочешуйчатый серицит, их распределение подчеркивает первично-зональное строение минерала. Реликтовый таблитчатый клинопироксен (размер 0.4–0.8 мм) нацело замещен тускло-зеленой роговой обманкой или агрегатом ее мелких призматических зерен. Роговая обманка, в свою очередь, пятнами хлоритизирована с выделением сгустков титанита. Биотит и кварц размером от 0.2–0.7 до 1–1.2 мм располагаются по границам породообразующих минералов, обрастают зерна клинопироксена. Биотит полностью хлоритизирован с выделением нитевидно-струйчатых скоплений титанита. Кварц выполняет промежутки между породообразующими минералами, корродирует их или образует с ними сростки. Встречаются призматические кристаллы циркона размером около 0.2 мм и зерна апатита размером от 0.05 до 0.2 мм. Рудный минерал представлен лейкоксенизированным ильменитом или титаномагнетитом, образует ксеноморфные зерна размером 0.1–0.3 мм, часто обрастается биотитом.

В рудной зоне по метадолериту развивается *пирит-серицит-кварцевый метасоматит* (шл. 1144-2, 1145-1, 1145-2). Текстура сланцеватая, полосчатая с элементами пятнистой. Структура лепидогранобластовая с элементами реликтовой (магматической?). Порода состоит из агрегата разноморфного кварца (40–70 %), тонкочешуйчатого серицита (30–60 %) с незначительным количеством лейкоксена и титанита (1–2 %), с единичными зернами циркона. В них присутствует неравномерная рассеянная вкрапленность сульфидов (от 2–3 до 10–15 %).

Матрикс породы сложен кварц-серицитовым агрегатом. Резко возрастает количество кварца, который имеет радиально-волнистое погасание, иногда однородную оптическую ориентировку. Кварц образует мелко- и среднезернистый агрегат зерен размером 0.1–0.8 мм, развитых в виде пятен или стебельчатых выделений, обрастающих пирит. Встречаются участки зерен кварца, цементирующегося пылеватым агрегатом рудного минерала. Серицит в виде ориентированных листочков со слабой желтоватой окраской, размером 0.005–0.02 мм (в результате частичной перекристаллизации, с укрупнением до 0.1 мм) развит совместно с кварцем. Среди них в незначительном количестве присутствует радиально-лучистый альбит, который совместно с кварцем обрастает кристаллики пирита. Лейкоксен в парагенезисе с медово-желтым титанитом располагается в серицит-кварцевом матриксе породы или образует псевдоморфозы по реликтовым вкрапленникам темноцветного минерала. Отмечается присутствие единичных мелких (0.05 мм) призмочек

циркона. Кристаллы сульфидов размером от 0.05 до 1 мм довольно многочисленны, на них наблюдаются каемки стебельчатого кварца.

Порода, подвергаясь метасоматозу, практически утратила первичное строение и состав, но присутствие псевдоморфоз по плагиоклазу и темноцветному минералу, а также скоплений лейкоксена позволяет предположить ее первично-магматическую природу и основной состав, что, впрочем, прекрасно видно в обнажении.

Минеральный состав руд

В кварцевых прожилках текстура руд полосчатая, от густо до убого вкрапленной, местами гнездовая. Структура преимущественно гипидиоморфнозернистая, мелко- и среднезернистая. Размер рудных минералов колеблется в широких пределах — от 0.1 до 1 мм, но некоторые прожилки выполнены агрегатом более крупных зерен сульфидов, в основном пирита — до 2 мм.

По минеральному составу руды являются пиритовыми с подчиненным количеством арсенопирита, который, однако, на некоторых участках преобладает. Неравномерность распределения пирита и арсенопирита в рудных прожилках и их взаимоотношения хорошо проявляются на многослойных картах ЭДС распределения элементов (рис. 4).

Основным второстепенным минералом на рудопроявлении является сфалерит. В рудных прожилках скопления сфалерита располагаются полосами, образуя вместе с пиритом и арсенопиритом полосчатую текстуру (рис. 5), или отдельными гнездами.

Пирит

Пирит чаще всего образует выделения неправильной, близкой к изометричной формы (рис. 4, а) или гипидиоморфные кристаллы (рис. 5, а), реже кристаллы кубической формы (рис. 4, б). Большинство кристаллов и зерен пирита сильно трещиноватые, подвергшиеся катаклазу. Основной примесью в пирите является As, содержание которого колеблется от 0.29 до 3.14 мас. % (среднее — 1.53 мас. %), в части зерен пирита примесь As не обнаружена. Проанализировано 50 зерен пирита, выполнено 59 определений их состава. Частота встречаемости примеси As в пирите составила 59 %. При этом на участках, обогащенных арсенопиритом, всегда присутствует примесь As в пирите, а на участках преимущественного развития пирита примесь As в нем не фиксируется. В табл. 1 приведены типичные анализы состава пирита с высокими и низкими значениями содержания As, без примеси As (не обнаружена), при этом сохранена частота встречаемости примеси.

Достаточно часто встречаются зерна пирита, в которых примесь As распределена неравномерно. На BSE-изображениях участки пирита, обогащенные примесью As, имеют более светлый тон и более темный тон, если примесь As не обнаружена (рис. 6). Однако контраст между участками едва различим, хотя разница в содержании примеси As может достигать 3 мас. % (рис. 6, с).

Неравномерное распределение примеси As выявляет неоднородное строение зерен пирита. Четкой зо-

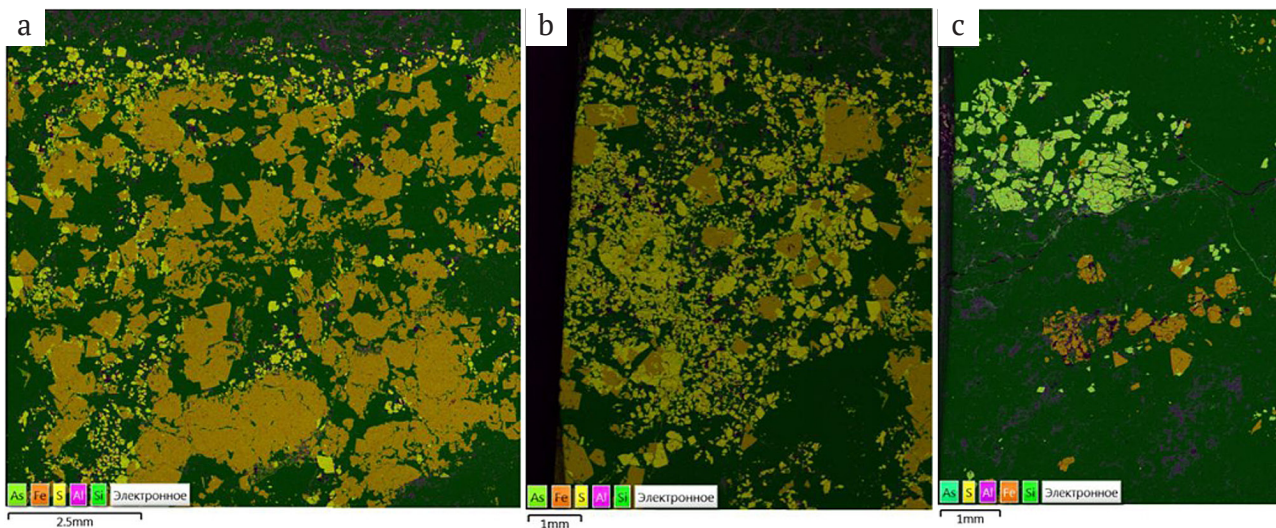


Рис. 4. Соотношение и взаиморасположение пирита и арсенопирита в рудных прожилках проявления Верхнелекеецкое: а – преобладает пирит (анш. ЛК-1, участок 2), б – преобладает арсенопирит (анш. ЛК-1, участок 1), с – арсенопирит (зеленое) и пирит (коричневое) разобщены в пространстве (анш. ЛК-1, участок 3)

Fig. 4. Ratio and arrangement of pyrite and arsenopyrite in ore veinlets of the Verkhnelekeletskiye occurrence: a – pyrite predominates (sec. LK-1, site 2), b – arsenopyrite predominates (sec. LK-1, site 1), c – arsenopyrite (green) and pyrite (brown) are separated in space (sec. LK-1, area 3)

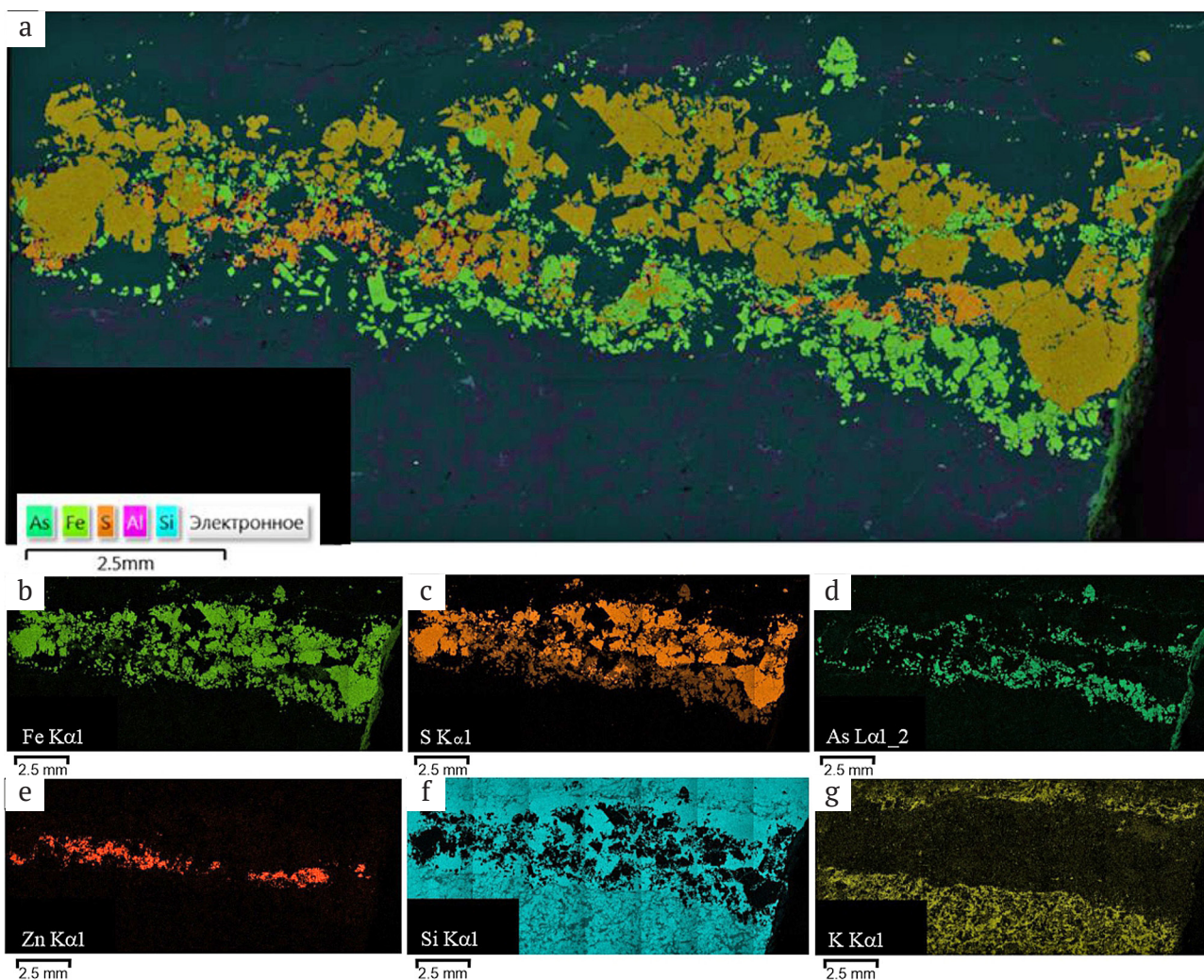


Рис. 5. Взаимоотношения пирита, арсенопирита и сфалерита в рудных прожилках проявления Верхнелекеецкое (а), поэлементные карты распределения рудных (б–е) и породообразующих (f, g) элементов, которые показывают распределение кварца и серицита

Fig. 5. Interrelations of pyrite, arsenopyrite, and sphalerite in ore veinlets of the Verkhnelekeletskiye occurrence (a), elemental maps of the distribution of ore (b–e) and rock-forming (f, g) elements, which show the distribution of quartz and sericite



Таблица 1. Химический состав пирита (мас. %)
Table 1. Chemical composition of pyrite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Fe	As	S	Сумма / Total
ЛК-1	2-14	47.05	0.72	52.26	100.03
	2-15	46.73	0.53	52.55	99.81
	3-3	46.50	2.61	50.85	99.96
	3-5	46.80	н.о.	52.69	99.48
ЛК-2	1-2	45.32	2.36	51.99	99.68
	2-13	45.82	н.о.	54.10	99.92
ЛК-4	6-4	46.11	н.о.	53.19	99.30
	13-3	45.56	0.29	52.65	98.50
	14-2	45.59	3.14	51.16	99.90
ЛК-8	3-2	46.78	н.о.	53.87	100.65

Примечание. Н. о. — не обнаружено. Анализ выполнен на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMH (предел обнаружения As ≤ 0.2 мас. %).

Note. Н. о. — not detected. The analysis was performed with TESCAN VEGA 3 LMH scanning electron microscope (detection limit As ≤ 0.2 wt. %).

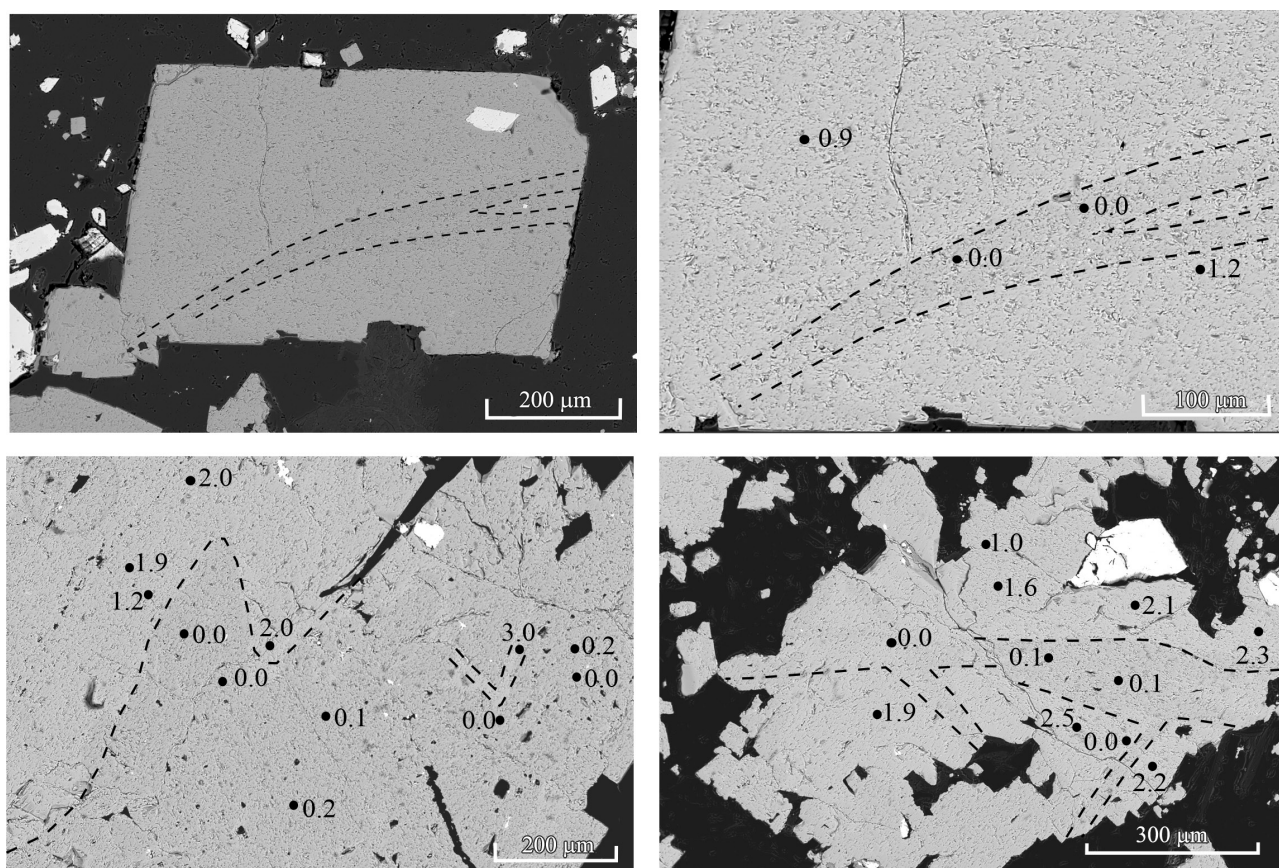


Рис. 6. Неясно-зональное распределение примеси мышьяка в кристаллах пирита. На фото показаны точки анализа, цифры — содержание As, мас. %. BSE-изображения и анализы состава пирита выполнены на сканирующем электронном микроскопе ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM (предел обнаружения As ≤ 0.1 мас. %)

Fig. 6. Vague zonal distribution of arsenic impurities in pyrite crystals is unclear. The photo shows analysis points, the numbers show the As content, wt. %. BSE images and analyzes of the pyrite composition were performed with ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM scanning electron microscope (detection limit As ≤ 0.1 wt. %)

нальности в распределении As наблюдать не удалось, но имеется тенденция обогащения As внешних зон выделений пирита (рис. 6). По-видимому, содержание As возросло в гидротермальном растворе к концу процесса, причем прирост содержания As в пирите достигал 3 мас. %.

Арсенопирит

Арсенопирит образует кристаллы ромбо-призматического габитуса или гипидиоморфные выделения (рис. 7, а–с). Размеры зерен арсенопирита лежат в пре-

делах от 0.02 до 0.2 мм. Основной примесью в арсенопирите является Sb, ее содержание колеблется от 0.26 до 1.80 мас. % (среднее — 0.84 мас. %), в части зерен примесь Sb не обнаружена. Выполнено порядка 70 определений состава арсенопирита, проанализировано 60 зерен. Частота встречаемости примеси Sb в арсенопирите составила 32 %. В табл. 2 приведены типичные анализы состава арсенопирита с максимальным разбросом содержаний примеси Sb.

Достаточно часто встречаются зональные кристаллы арсенопирита (рис. 7, b, c, d, f). В их центральных частях в виде ядра или в краевой части наблюда-

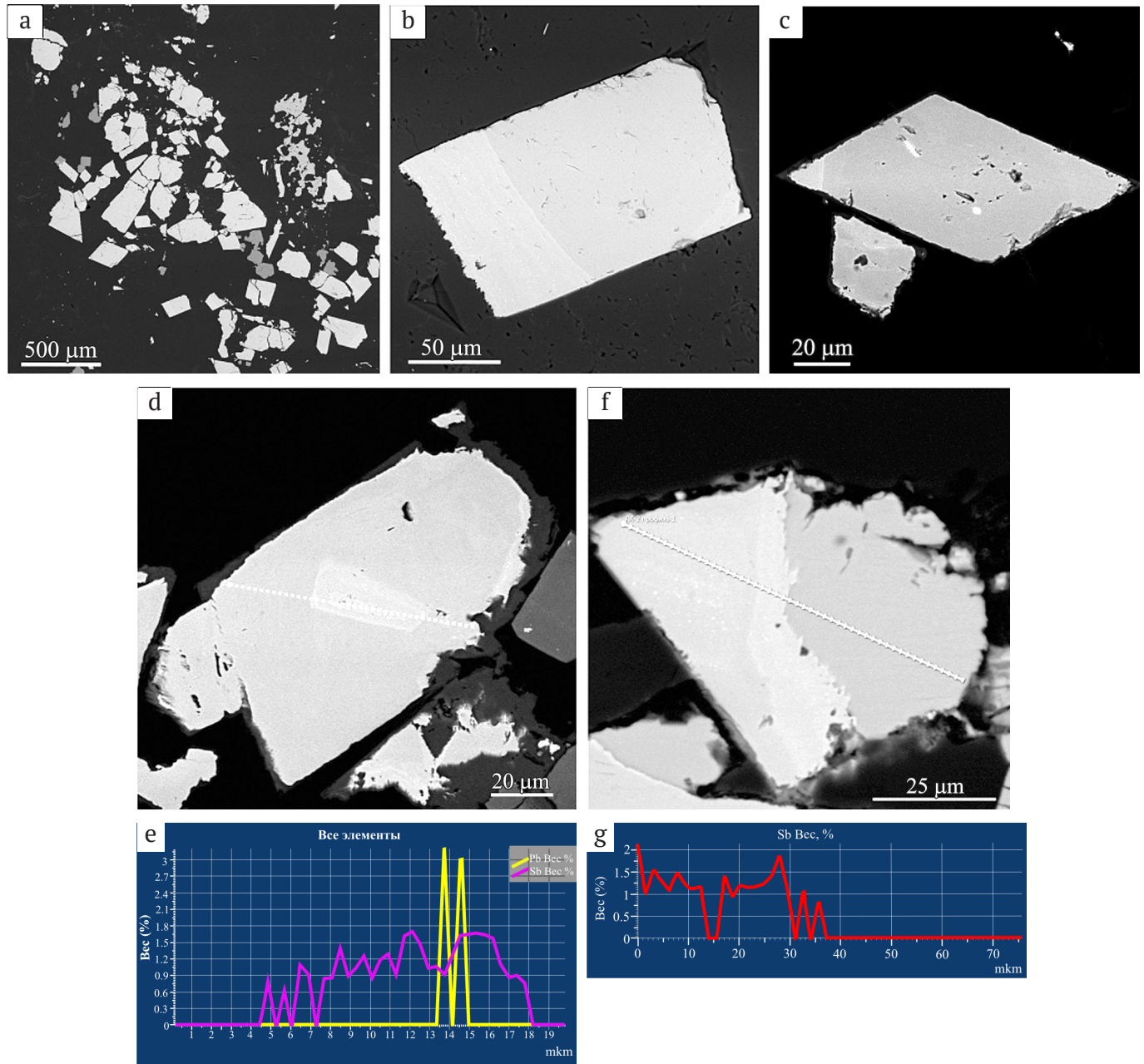


Рис. 7. Арсенопирит: гипидиоморфные выделения (а) и кристаллы (b, c) (анш. ЛК-3/2, ЛК-4); зональные кристаллы арсенопирита: центральная светлая зона с галенитом (белые точки) и фазой состава Pb-Sb-S (серое) (d), распределение Pb и Sb в профиле через центральную зону зерна арсенопирита (e) (анш. ЛК-1/6); сросток арсенопирита с эмульсионной вкрапленностью Pb-Sb-S и сфалерита (справа) (f), распределение Sb в профиле I-I' (g) (анш. ЛК-2/4)

Fig. 7. Arsenopyrite: hypidiomorphic segregations (a) and crystals (b, c) (sec. LK-3/2, LK-4); zoned arsenopyrite crystals: central light zone with galena (white dots) and Pb-Sb-S phase (gray) (d), distribution of Pb and Sb in the profile through the central zone of arsenopyrite grains (e) (sec. LK-1/6); intergrowth of arsenopyrite with emulsion dissemination of Pb-Sb-S and sphalerite (right) (f), Sb distribution in profile I-II (g) (sec. LK-2/4)



Таблица 2. Химический состав арсенопирита (мас. %)
 Table 2. Chemical composition of arsenopyrite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Fe	As	Sb	S	Сумма / Total
ЛК-1	1-6	38.19	38.13	0.30	23.70	100.32
	2-10-1	36.79	38.67	1.58	22.63	99.67
ЛК-2	2-2	34.22	43.94	н.о.	21.85	100.01
	2-7	34.28	42.59	0.91	22.69	100.47
	4-1	33.72	44.23	1.32	20.8	100.07
ЛК-3	2-3	34.65	42.32	0.42	22.55	99.94
	2-4	34.62	42.98	н.о.	22.39	99.99
	2-5	34.51	42.30	0.26	22.13	99.21
	2-8	33.26	44.54	1.80	20.04	99.63
ЛК-4	17-1	34.27	43.00	н.о.	21.77	99.04

Примечание. Н. о. — не обнаружено. Анализ выполнен на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMN (предел обнаружения Sb ≤ 0.2 мас. %).

Note. Н. о. — not detected. The analysis was performed with TESCAN VEGA 3 LMN scanning electron microscope (detection limit Sb ≤ 0.2 wt. %).

ются более светлые по тону участки с эмульсионной вкрапленностью ярких точек. Эти участки обогащены Sb и Pb (рис. 7, e) или только Sb (рис. 7, g). Более темная зона арсенопирита имеет обычный состав и не содержит Sb. Яркие точки представляют собой фазу состава Pb-Sb-S с переменным соотношением Pb и Sb размером 300–400 нм или PbS (галенита) такой же размерности. Точная диагностика этих нановыделений затруднена из-за чрезвычайно малых размеров, определения проведены на качественном уровне по наличию характерных элементов.

Спорадически в составе арсенопирита отмечается примесь Ni в количестве от 0.89 до 2.88 мас. %.

Сфалерит

Сфалерит образует ксеноморфные выделения размером до 0.2 мм в ассоциации с арсенопиритом и пиритом (рис. 5; 7, f). Рассеянная вкрапленность хорошо образованных выделений сфалерита размером от 5 до 20 мкм встречается в кварце, рядом располагаются кристаллики рутила и выделения галенита размером около 5 мкм каждый. Выполнено 21 определение состава сфалерита. В табл. 3 приведены результаты анализов наиболее типичных составов минерала.

Сфалерит характеризуется стабильным составом. Основными примесями в нем являются Fe с общим колебанием содержаний от 5.68 до 7.25 мас. % (разница в значениях — 1.57 мас. %, среднее — 6.75 мас. %) и Cd — от 0.49 до 0.92 мас. % (разница в значениях — 0.43 мас. %, среднее — 0.68 мас. %).

Тетраэдрит

Тетраэдрит является одним из наиболее распространенных редких минералов в рудопроявлении Верхнелекелецкое. Минерал образует тонкую рассеянную вкрапленность в кварце наряду с другими сульфидными (пиритом, арсенопиритом, сфалеритом, пирротинном, галенитом) и нерудными — слюдой, титанитом. Тетраэдрит образует индивидуальные ксеноморфные выделения в интерстициях между зернами кварца. Размер выделений 4–5 мкм. Чаше тетраэдрит отмечается в виде микровключений размером от 2 до 20 мкм в пирите, редко в сфалерите. В составе тетраэдрита постоянно присутствует примесь Ag (1.08–3.81 мас. %), Zn (0.62–4.94 мас. %), Fe (3.53–5.94 мас. %, иногда до 8.91 мас. %) (табл. 4).

Усредненная эмпирическая формула тетраэдрита: $(\text{Cu}_{9.02}\text{Fe}_{1.90}\text{Zn}_{0.75}\text{Ag}_{0.33})_{12.00}\text{Sb}_{4.04}\text{S}_{12.96}$.

Таблица 3. Химический состав сфалерита (мас. %)
 Table 3. Chemical composition of sphalerite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Zn	Fe	Cd	S	Сумма / Total
ЛК-1	4-1	59.34	7.25	0.62	33.28	100.49
	4-4	59.85	6.19	0.49	33.12	99.65
	7-2	58.83	7.08	0.75	33.15	99.80
	7-3	61.23	5.68	0.53	32.76	100.20
ЛК-2	2-17	57.53	6.77	0.63	34.17	99.10
	2-19	57.08	6.69	0.92	33.41	98.10
ЛК-3	1-6	57.81	6.82	0.82	34.23	99.69
	1-9	58.22	6.96	0.83	34.09	100.11
	1-10	57.72	6.82	0.79	34.28	99.61
	2-13	58.81	5.90	0.73	34.37	99.81

Таблица 4. Химический состав тетраэдрита (мас. %)
 Table 4. Chemical composition of tetrahedrite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Cu	Fe	Sb	S	Zn	Ag	Сумма/ Total
ЛК-3	15-1	34.4	5.40	30.40	25.65	1.60	2.03	99.48
	16-1	32.9	4.67	29.05	24.83	1.67	1.73	98.89
	17-1	34.13	5.34	30.57	25.41	1.11	3.20	99.77
ЛК-4	18-1	32.22	5.94	28.24	24.63	4.94	3.02	98.98
	22-3	34.49	5.38	29.29	24.52	2.83	1.61	98.11

Сульфосоли

На рудопроявлении Верхнелекелецкое нами обнаружен минерал системы Pb-Sb-S. Он встречается в виде микровключений в пирите и арсенопирите, имеет широкий диапазон размерности — от 500 нм, чаще 2–10 мкм, редко до 50 мкм. Наблюдаются как его индивидуальные выделения, так и сростки с галенитом, тетраэдритом и халькопиритом. В редких случаях отмечаются его сростки с пиритом в кварце (рис. 8, а). Состав минеральных фаз переменный, содержание основных компонентов составляет (мас. %): Pb — 55.33–56.19; Sb — 24.07–25.84; S — 17.00–20.10 (табл. 5). В системе Pb-Sb-S (сульфосоли или сульфоантимониды) выделяется несколько групп минералов: плагионита, буланжерита, робинсонита, моёлоита — всего 9 минералов,

которые отличаются разным соотношением основных компонентов (рис. 8). На тройной диаграмме Pb-Sb-S составы минералов проявления Верхнелекелецкое располагаются близко к точке состава буланжерита (рис. 8). Предварительно можно диагностировать минерал состава Pb-Sb-S, обнаруженный на проявлении Верхнелекелецкое как буланжерит. Средний химический состав пересчитывается на формулу $Pb_{5.33}Sb_{4.1}S_{10.90}$.

На проявлении Верхнелекелецкое нами установлены минералы никеля — ульманнит и герсдорфит.

Ульманнит

Минерал образует выделения изометричной формы или частично ограниченные кристаллы в кварце (рис. 9). Встречается в сростках с пирротинном. Размер

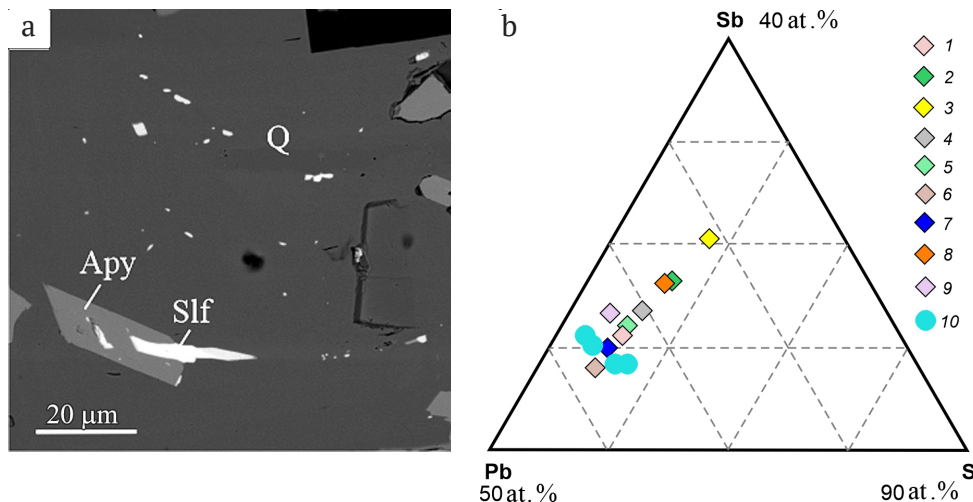


Рис. 8. Сросток минерала системы Pb-Sb-S (Slf) с арсенопиритом в кварце (а); диаграмма состава минералов системы Pb-Sb-S (b) (1 — семсейит, 2 — плагионит, 3 — фюлеппит, 4 — гетероморфит, 5 — плюмосит, 6 — фалькманит, 7 — буланжерит, 8 — робинсонит, 9 — моёлоит, 10 — сульфосоли рудопроявления Верхнелекелецкое, табл. 5)

Fig. 8. Intergrowth of a mineral of the Pb-Sb-S (Slf) system with arsenopyrite in quartz (a); diagram of compositions of minerals of the Pb-Sb-S system (1 — semseite, 2 — plagiomite, 3 — fuleppite, 4 — heteromorphite, 5 — plumosite, 6 — falkmanite, 7 — boulangerite, 8 — robinsonite, 9 — moeloite, the sulfosalt of the Verkhnelekeletskeye ore occurrence, table 5)

Таблица 5. Химический состав сульфосоли (мас. %)
 Table 5. Chemical composition of sulfosalt (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Pb	Fe	Sb	S	Сумма / Total
ЛК-1	5-3	49.55	1.96	21.21	17.38	90.09
	5-5	48.87	2.54	21.71	17.75	90.86
ЛК-2	3-1	55.51	1.47	25.84	17.00	99.82
ЛК-6	2-1	56.19	н.о.	25.40	17.79	99.38

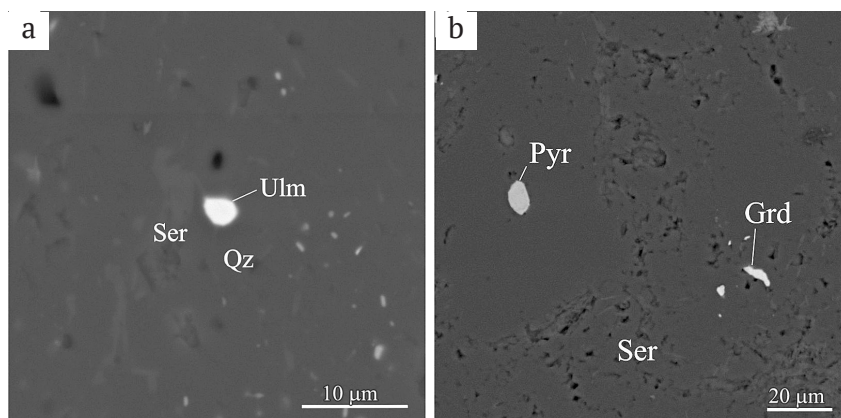


Рис. 9. Ульманнит (Ulm) в серицит-кварцевом (Ser-Qz) агрегате (a), герсдорфит (Grd) и пирротин (Pyr) (b)
Fig. 9. Ulmannite (Ulm) in sericite-quartz (Ser-Qz) aggregate (a), gersdorfite (Grd) and pyrrhotite (Pyr) (b)

Таблица 6. Химический состав ульманнита (мас. %)
Table 6. Chemical composition of ulmannite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Ni	Sb	As	S	Сумма / Total
ЛК-3	14-1	26.46	56.47	1.79	15.26	99.99
	18-1	26.45	56.80	1.17	15.03	99.45
	19-1	25.87	56.93	1.46	15.25	99.50
ЛК-6-1	4-1	26.64	56.15	1.90	15.04	99.73
	5-1*	26.37	55.56	2.52	14.82	99.92
	25-1	26.13	56.52	2.16	15.87	100.69

Примечание. *В результатах анализа присутствует Fe (0.65 мас. %) из вмещающего арсенопирита.

Note. * The analysis results contain Fe (0.65 wt. %) of host arsenopyrite.

Таблица 7. Химический состав герсдорфита (мас. %)
Table 7. Chemical composition of gersdorfite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Ni	Co	As	S	Fe	Ti	Si	Сумма / Total
ЛК-2	9-3	16.49	2.13	37.94	21.78	14.15	1.19	6.93	100.61
ЛК-6-1	21-1*	24.33	н.о.	47.43	20.46	8.12	н.о.	н.о.	101.03

Примечание. *В результатах анализа фиксируется Sb (0.69 мас. %).

Note. * 0.69 wt. % Sb is recorded in the analysis results.

выделений от 3 до 20 мкм. Химический состав (табл. 6) пересчитывается на формулу $Ni_{0.95}Sb_{0.98}As_{0.03}S_{0.99}$.

Герсдорфит

Минерал встречен в единичных выделениях удлиненной формы, размером около 2 мкм в кварце в сростании с пирротинном, отсюда высокие содержания Si и Fe в результатах анализа (табл. 7, ан. 9–3). Зерно размером 10 мкм в кварце с примесью серицита, рядом расположено выделение пирротина (рис. 9). Химический состав пересчитывается на формулу $(Ni_{0.63}Co_{0.08})_{0.71}As_{1.14}S_{0.86}$.

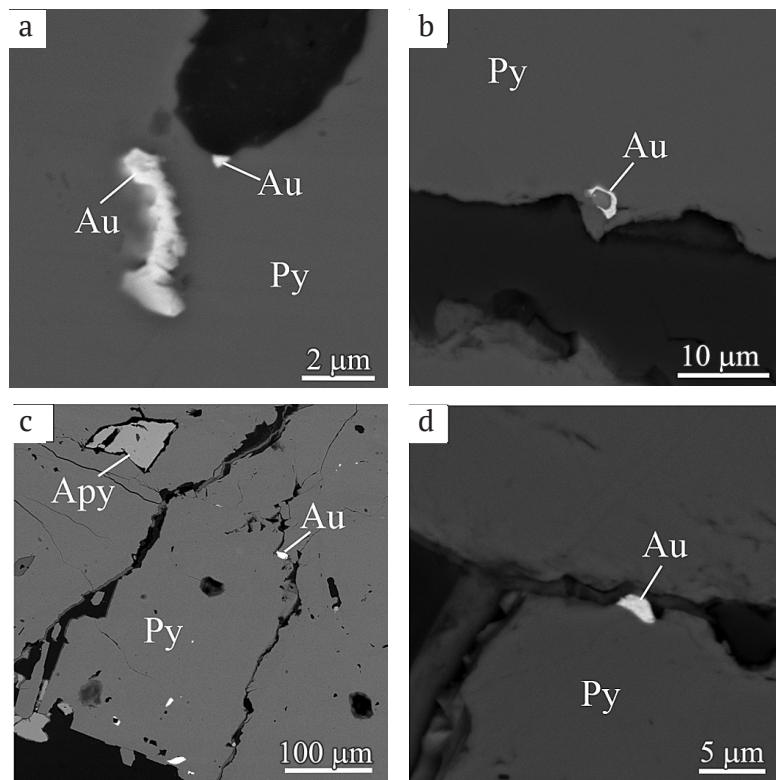
Золото

В рудах проявления Верхнелекеецкое золото обнаружено только в виде субмикронных включений в пирите и арсенопирите. Установлено 18 золотинок размером от 300–500 нм до 10 мкм, в большинстве

1–5 мкм. Из-за малых размеров частиц золота, сопоставимых с размером области генерации рентгеновского излучения, часть полученных анализов состава золота нельзя считать количественными. Если минимальный размер исследуемого объекта около 1 мкм, сумма элементов приведена к 100 %. Форма золотинок близка к изометричной, редко встречается удлиненная. Как правило, приуроченности частиц золота к трещинкам в пирите и арсенопирите не наблюдается (рис. 10).

Основной примесью в золоте является серебро, содержание которого колеблется от 14.42 до 27.65 мас. % (табл. 8). В двух золотинок обнаружены высокие содержания Hg. В связи с этим пробность золота варьирует в широких пределах. Умеренно высокопробного золота (816–857 ‰) — 55 %, средней пробности (724–762 ‰) — 27 %, низкопробного (606–677 ‰) — 18 %.

Кроме описанных выше минералов, в рудах установлены небольшие количества галенита, халькопирита, пирротина, единичные зерна хромшпинелида.


Рис. 10. Золото в пирите:

a — на контакте с рутилом (черное) (ЛК-4-17); b — с высоким содержанием Hg (ЛК-8-1), c — с включениями фазы Pb-Sb-S и галенита (ЛК-2-1), d — с высоким содержанием Hg (ЛК-8-3). BSE-изображения

Fig. 10. Gold in pyrite:

a — on contact with rutile (black) (ЛК-4-17); b — with a high content of Hg (ЛК-8-1), c — with inclusions of Pb-Sb-S phase and galena (ЛК-2-1), d — with a high content of Hg (ЛК-8-3). BSE-images

Таблица 8. Химический состав субмикронного золота в пирите и арсенопирите проявления Верхнеелекецкое (мас. %)

Table 8. Chemical composition of submicron gold in pyrite and arsenopyrite from the Verkhnelekeletskeye occurrence (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Au	Ag	Hg	Сумма / Total	Пробность, ‰ Fineness, ‰
ЛК-2	1-4	81.81	18.21	н. о.	100.03	818
ЛК-4	16-1	84.66	15.35	н. о.	100.01	845
	17-2	81.54	18.34	н. о.	99.88	816
	17-3	81.58	18.01	н. о.	99.59	819
ЛК-6-1	1-1	72.35	27.65	н. о.	100.00	724
	2-1	84.95	15.05	н. о.	100.00	850
	2-2	74.13	25.87	н. о.	100.00	741
	2-3	76.23	23.77	н. о.	100.00	762
ЛК-6-п-3	22-1	86.23	14.42	н. о.	100.65	857
ЛК-8	1-1	61.58	20.07	9.35	91.00	677
	3-1	56.80	25.91	10.97	93.68	606

Галенит присутствует в виде обособленных включений (размером до 6 мкм) в пирите и арсенопирите или в составе комплексных микровключений с тетраэдритом и фазой Pb-Sb-S. Из-за малого размера выделения анализ состава галенита некорректный, т. к. включает элементы минералов-хозяев (Fe, As) и порообразующих элементов, но вполне уверенно диагностируется по атомному соотношению свинца и серы. Галенит изредка встречается в виде ангедральных выделений в кварце, образуя рассеянную вкрапленность или гнез-

дообразные скопления. Халькопирит встречается редко, в небольшом количестве, образуя микронные включения (до 20 мкм) в пирите и арсенопирите, в виде индивидуальных выделений или в сростках с тетраэдритом и фазой Pb-Sb-S.

Выделения киновари обнаружены предположительно только в одном участке аншлифа. Они представлены тончайшими чешуйками длиной 2–3 мкм, приуроченными к слюдистому агрегату и ориентированными по его слоистости. Из-за крайне малых раз-



меров выделений идентифицировать их как киноварь можно только по присутствию в результатах анализа минералообразующих элементов (Hg и S) и их атомному соотношению. Породообразующие и акцессорные минералы (кроме кварца): серицит, титанит, рутил, монацит, ксенотим, циркон, минералы Th и U.

Изотопы серы

Данные по изотопам серы сульфидов представлены в табл. 9. Сульфиды в рудах проявления Верхнелекелецкое обогащены легким изотопом серы и имеют значения $\delta^{34}\text{S}$ в диапазоне от -1.2 до -3.5 ‰. Вариации значений: $\delta^{34}\text{S}$ от -1.2 до -1.5 ‰ — для пирита, от -2.3 до -3.5 ‰ — для арсенопирита, т.е. арсенопирит имеет несколько более облегченный состав серы. Изотопный состав серы сульфидов проявлений варьирует в весьма узком диапазоне — $\Delta\delta^{34}\text{S} = 2.3$ ‰.

Таблица 9. Изотопные составы серы сульфидов на проявлении Верхнелекелецкое

Table 9. Isotope contents of sulfide sulfur in the Verkhnelekeletskeye occurrence

№ образца Sample No.	Минерал Mineral	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ ‰
LK-1	Пирит / Pyrite	-1.5
LK-2		-1.2
LK-1a	Арсенопирит Arsenopyrite	-2.4
LK-1b		-2.3
LK-1c		-3.5

Обсуждение результатов

Рудопроявление Верхнелекелецкое выделяется среди других золотопроявлений Манитанырдского района по геологическому строению. Это пока единственное обнаруженное проявление, которое локализуется в краевой части дайки габбро-долеритов леквожского комплекса нижнего ордовика.

Рудная минерализация приурочена к зоне брекчирования габбро-долеритов, вмещающей более позднее прожилково-вкрапленное и кварцево-жильное оруденение. В рудной зоне интрузивная порода преобразована и превращена в пирит-серицит-кварцевый метасоматит.

По минеральному составу руды проявления Верхнелекелецкое аналогичны рудам Верхненияюского-2 и Нияхойского-2, но являются преимущественно пиритовыми с подчиненным количеством арсенопирита. В качестве основного второстепенного минерала присутствует сфалерит. В отличие от месторождения Верхненияюское-2, на котором четко проявлена поздняя галенит-халькопирит-сфалеритовая стадия, на проявлении Верхнелекелецкое галенит и халькопирит встречаются только в виде микровключений в пирите и арсенопирите. В отношении редких рудных минералов также наблюдается большое сходство с другими рудопроявлениями. На Верхнелекелецком установлен тетраэдрит, сульфосоли свинца (предположительно буланжерит). Специфическими чертами минералогии рудопроявления является повышенное содержание примеси As в пирите и его зо-

нальное распределение, повышенное содержание и зональное распределение Sb в арсенопирите. Впервые для района здесь обнаружены минералы никеля — ульманнит и герсдорфит.

Золото на рудопроявлении обнаружено только в виде субмикронных включений в пирите и арсенопирите. Основной примесью в золоте является серебро, ртуть встречается спорадически, в отличие от других рудопроявлений, где ртутистое золото встречается часто и имеет типоморфное значение. По распределению пробности золота (умеренно высокопробное и средней пробности) рудопроявление сопоставимо с Нияхойским-2 [8].

Для определения условий образования гидротермальной минерализации традиционно используются методы термобарометрии. Изучение флюидных включений в кварце основных золотопроявлений района (Верхненияюское-1 и -2, Нияхойское-2) позволило установить температурный интервал минералообразования, состав минералообразующих растворов и состав газовой фазы [7, 12]. Для изучения флюидных включений на проявлении Верхнелекелецкое были изготовлены полированные пластинки толщиной 200—300 мкм из кварц-сульфидных прожилков и кварцевых обособлений в самой рудной брекчии. Исследование проводилось на микроскопе Amplival (Carl Zeiss Jena) с использованием длиннофокусного объектива 50×, DW 10.6. При максимальном увеличении флюидных включений визуально не обнаружено. Отсутствие видимых флюидных включений (больше 2 мкм) можно объяснить довольно равномерным поступлением флюидного раствора при минералообразовании, без резких колебаний температур и давлений.

Сульфиды (пирит и арсенопирит) проявления Верхнелекелецкое характеризуются легким изотопным составом серы ($\delta^{34}\text{S} = -0.2 \div -3.5$ ‰), близким к метеоритному стандарту, узким диапазоном вариаций ($\Delta\delta^{34}\text{S} \leq 2.3$ ‰), что обычно свойственно системам с магматическими источниками серы [10, 14]. Это свидетельствует об участии глубинных источников серы в рудообразовании и его связи с магматическими процессами. По этому признаку проявление аналогично месторождению Верхненияюское-2 [7].

Особенности локализации и строения рудопроявления Верхнелекелецкое и минерального состава руд позволяют высказать предположение об условиях его образования. Возраст даек габбро-долеритов леквожского комплекса в Енганепэ-Манитанырдском районе считается раннеордовикским на основании отсутствия интрузий среди карбонатных отложений хантейской свиты среднего ордовика. Это подтверждается данными изотопного датирования Sm/Nd-методом (476 ± 61 млн лет [3]), полученными по монофракциям амфиболов, плагиоклаза и валовому составу габброидов. Однако абсолютный возраст долеритов рудопроявления Верхнелекелецкое не определялся. После становления интрузии в ее краевой части произошло дробление пород с образованием зоны брекчирования. По ослабленной зоне поступали гидротермальные растворы, которые вызвали метасоматические преобразования, в результате которых обломки первичных габброидов превратились в пирит-серицит-кварцевые метасоматиты и были сцементированы кварцем. На следующем этапе при

проявлении сколовых напряжений и раскрытию трещин по ним снова поступали гидротермальные растворы, несущие рудные компоненты. Если принять на основании геологических данных возраст интрузии долеритов раннеордовикским, то возраст золоторудной минерализации можно определить как послераннеордовикский. На настоящий момент на рудопроявлении можно выделить только одну стадию — золото-пирит-арсенопиритовую с тонкодисперсным золотом, сопоставимую с ранней стадией рудообразования на месторождении Верхнеиясское-2 [7]. Вероятно, поздняя (галенит-халькопирит-сфалеритовая) стадия проявилась слабо и представлена микроминерализацией в пирите и арсенопирите.

Заключение

Несмотря на то, что пока свободного золота в рудах проявления Верхнелекелецкое обнаружить не удалось ввиду его недостаточной изученности из-за ограниченного количества материала, рудопроявление представляет интерес для дальнейшей разведки. Содержание золота в руде по данным атомно-абсорбционного анализа составляет 2.16 и 2.65 г/т (ЦЛ ВСЕГЕИ). Возраст дайки долеритов и золото-арсенопирит-пиритовой минерализации остается дискуссионным и требует продолжения исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Республики Коми в рамках научного проекта № 20-45-110006.

Литература

1. Вахрушев С. Н., Макаров А. Б. Минералогическо-геохимические особенности руд и метасоматитов золото-мышьяковых проявлений одного из районов // Геохимия и минералогия первичных и вторичных ореолов. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1986. С. 84–93.

2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q-41 — Воркута. Объяснительная записка / М. А. Шишкин, А. П. Астапов, Н. В. Кабатов и др. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.

3. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XI (Елецкий). Объяснительная записка / М. А. Шишкин, О.Н. Малых, П.Е. Попов, Л.С. Колесник. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 217 с.

4. Гриненко В. А. Приготовление двуокиси серы для изотопного анализа // Журн. неорганической химии. 1962. № 7. С. 2578–2582.

5. Ефанова Л. И., Карчевский А. Ф. Вариант геолого-поисковой модели золоторудных объектов (минерализованных зон с золотосульфидным оруденением, жильно-прожилковых зон с золото-кварц-сульфидным оруденением) применительно к площади хребта Манитаньрд // Материалы XV Геологического съезда Республики Коми. Т. III. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2009. С. 181–188.

6. 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.

7. Кузнецов С. К., Майорова Т. П., Сокерина Н. В., Филиппов В. Н. Золоторудная минерализация Верхнеиясского

месторождения на Полярном Урале // Записки РМО. 2011. Ч. СХХХ. № 4. С. 58–71.

8. Майорова Т. П., Ефанова Л. И. Проявление золото-мышьяковистого типа Нияхойское-2 на Полярном Урале (кряж Манитаньрд) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 8. С. 33–41.

9. Майорова Т. П., Устюгова К. С. Минералогические и изотопно-геохимические особенности золоторудных проявлений Енганепэ-Манитаньрдского района (Полярный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 12. С. 4–10.

10. Рай Р., Омото Х. Обзор исследований изотопов серы и углерода применительно к проблеме генезиса руд // Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. М.: Мир, 1997. С. 176–212.

11. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГТА, 2001. 622 с.

12. Сокерина Н. В., Зыкин Н. Н., Ефанова Л. И., Шанина С. Н., Симакова Ю. С. Условия формирования кварцевых жил золоторудных проявлений Манитаньрдского района (Приполярный Урал) // Литосфера. 2010. № 2. С. 100–111.

13. Ignatiev A. V., Velivetskaya T. A., Budnitskiy S. Y., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V. and Levitskii V. I. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution // Chemical Geology, 2018. V. 493. P. 316–326.

14. Ohmoto H., Rye R. O. Isotopes of sulfur and carbon // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York. 1979. P. 509–567.

15. Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V. An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision // Rapid Commun. Mass Spectrom, 2019. V. 33. P. 1722–1729.

References

1. Vakhrushev S. N., Makarov A. B. *Mineralogo-geokhimiicheskiye osobennosti rud i metasomatitov zolotomyslysh'yakovykh proyavleniy odnogo iz rayonov* (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 USC AS USSR, 1986, pp. 84–93.

2. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Ural series. Sheet Q-41 — Vorkuta. Explanatory note. M. A. Shishkin, A. P. Astapov, N. V. Kabatov et al. St. Petersburg: VSEGEI, 2007, 541 p.

3. State geological map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Second edition. Series Polar Urals. Sheet Q-41-XI (Yeletsky). Explanatory note. M. A. Shishkin, O. N. Malykh, P. E. Popov, L. S. Kolesnik. Moscow: MF VSEGEI, 2013, 217 p.

4. Grinenko V. A. *Prigotovleniye dnuokisi sery dlya izotopnogo analiza* (Preparation of sulfur dioxide for isotopic analysis). Journal of Inorganic Chemistry, 1962, No. 7, pp. 2578–2582.

5. Efanova L. I., Karchevsky A. F. *Variants geologo-poiskovoy modeli zolotorudnykh ob'ektov (mineralizovannykh zon s zoloto-sul'fidnym orudneniyem, zhil'no-prozhilkovykh zon s zoloto-kvarts-sul'fidnym orudneniyem) primenitel'no k ploshchadi khrehta Manitanyrd* (A variant of the geological prospecting model of gold objects (mineralized zones with gold-sulfide mineralization, vein-vein zones with gold-quartz-sulfide mineralization) in relation to the area of the Manitanyrd Ridge). Proceedings of



the 15th Geological Congress of the Komi Republic, V. III, Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2009, pp. 181–188.

6. Efanova L. I., Kuznetsov S. K., Tarbaev M. B., Maiorova T. P. *Zolotonosnost' Manitanyrdskogo rayona i perspektivy narschivaniya resursnogo potentsiala* (Polyarnyy Ural) (Gold content of the Manitanyrd region and prospects for increasing the resource potential (Polar Urals)). *Ores and metals*, 2020, No. 3, pp. 39–51.

7. Kuznetsov S. K., Maiorova T. P., Sokerina N. V., Filippov V. N. *Zolotorudnaya mineralizatsiya Verkhneyayuskogo mestorozhdeniya na Polyarnom Urale* (Gold mineralization of the Verkhniayuskoye deposit in the Polar Urals). *Proceedings of RMS*, 2011, Ch. CXXXX, No. 4, pp. 58–71.

8. Mayorova T. P., Efanova L. I. *Proyavleniye zolotomyslyakovistogo tipa Niyakhoyskoye-2 na Polyarnom Urale (kryazh Manitanyrd)* (Niyakhoyskoe-2 occurrence of the gold-arsenic type in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge)). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 2019, No. 8, pp. 33–41.

9. Mayorova T. P., Ustyugova K. S. *Mineralogicheskiye i izotopno-geokhimicheskiye osobennosti zolotorudnykh proyavleniy Yengayep-e-Manitanyrdskogo rayona* (Polyarnyy Ural) (Mineralogical and isotope-geochemical features of gold ore manifestations of the Enganepe-Manitanyrdsky region (Polar Urals)). *Vestnik of IG Komi SC UB RAS*, 2015, No. 12, pp. 4–10.

10. Rai R., Omoto H. *Obzor issledovaniy izotopov sery i ugleroda primenitel'no k probleme genezisa rud* (Review of stud-

ies of sulfur and carbon isotopes in relation to the problem of ore genesis). *Stable isotopes and problems of ore formation*. Moscow: Mir, 1997, pp. 176–212.

11. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu. A. *Mestorozhdeniya zolota Urala* (Ural gold deposits). Yekaterinburg. Publishing house of the USMU, 2001, 622 p.

12. Sokerina N. V., Zykin N. N., Efanova, S. N. Shanina, and Simakova Yu. *Usloviya formirovaniya kvartsevykh zhil zolotorudnykh proyavleniy Manitanyrdskogo rayona (Pripolyarnyy Ural)* (Conditions for the formation of quartz veins of gold ore occurrences in the Manitanyrd region (Polar Urals)), 2010, No. 2, pp. 100–111.

13. Ignatiev A. V., Velivetskaya T. A., Budnitskiy S. Y., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V. and Levitskii V. I. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution. *Chemical Geology*, 2018, V. 493, pp. 316–326.

14. Ohmoto H., Rye R. O. *Isotopes of sulfur and carbon. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, 1979, pp. 509–567.

15. Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V. An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{35}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision. *Rapid Commun. Mass Spectrom*, 2019, V. 33, pp. 1722–1729.

Received / Поступила в редакцию 31.05.2022



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 551.89+551.794 (470.21)

DOI: 10.19110/geov.2022.6.3

Позднеледниково-голоценовая стратиграфия донных отложений из котловин малых изолированных озер баренцевоморского побережья (Кольский регион)

А. Н. Толстоброва, О. П. Корсакова, Д. С. ТолстобровГеологический институт КНЦ РАН, Апатиты
a.tolstobrova@ksc.ru, korsak@geoksc.apatity.ru, tolstobrov@geoksc.apatity.ru

Проведено литологическое изучение и диатомовый анализ донных отложений малых озер, относящихся к категории изолированных бассейнов, расположенных на баренцевоморском побережье Кольского региона. На основе полученных новых данных в районе пос. Териберка и опубликованных данных для других районов побережья выполнено стратиграфическое расчленение осадочных последовательностей и в них в качестве стратогенов выделены литолого-стратиграфические единицы (ЛСЕ). Установлено, что на баренцевоморском побережье приледниковый водоем во время дегляциации был морским, осадки пресноводного приледникового водоема (ЛСЕ 1) здесь не формировались. В котловинах озер, изолированных от моря, в осадочных последовательностях установлены: осадки солоноватоводного приледникового водоема (ЛСЕ 2), позднеледниковые солоновато-водные отложения (ЛСЕ 3), морские осадки (ЛСЕ 4), осадки водоема-залива, отчленяющегося от моря (ЛСЕ 5), осадки меромиктического озера (ЛСЕ 6), пресноводные отложения водоема береговой зоны моря (ЛСЕ 7), осадки пресноводного озера с повышенной минерализацией воды, образовавшиеся во время раннесреднеголоценовой трансгрессии тапес (ЛСЕ 8), современные озерные отложения (ЛСЕ 9).

Ключевые слова: осадочные последовательности, стратогены, изолированные бассейны, диатомовые водоросли.

The late-glacial – Holocene stratigraphy of bottom sediments from small isolated lakes in the Barents Sea coast (Kola region)

A. N. Tolstobrova, O. P. Korsakova, D. S. Tolstobrov

Geological Institute KSC RAS, Apatity

Lithological study and diatom analysis of the bottom sediments from small lakes belonging to the category of isolated basins located on the Barents Sea coast of the Kola region was carried out. Stratigraphic subdivision of depositional sequences was performed based on the new data obtained from the Settlement Teriberka area, as well as on the published data from other areas; lithostratigraphic units (LSU), which are stratogens, were identified in them. We found out that the proglacial reservoir was marine during deglaciation on the Barents Sea coast, freshwater (LSU 1) sediments of the ice-marginal basins were not found here (LSU 1). In the lake basins isolated from the sea, the depositional sequences in deep parts of isolated basins is represented by: brackishwater sediments of the proglacial basin (LSU 2), Lateglacial brackishwater sediments (LSU 3), marine sediments (LSU 4), sediments of an isolating lagoon (LSU 5), sediments accumulated in a meromictic lake (LSU 6), sediments of an onshore freshwater lake (LSU 7), sediments of a freshwater lake with slightly increased water mineralization deposited during Early-Mid Holocene Tapes transgression (LSU 8) and lacustrine sediments (LSU 9) are present in the sedimentary sequences from small isolated lakes in the Barents Sea coast.

Keywords: depositional sequences, stratogens, isolated basins, diatoms.

Введение

Донные отложения из малых озерных котловин, которые относятся к категории водоемов, изолированных в разное время от более крупного бассейна, являются объектом разносторонних исследований, так как они наименее подвержены размыву и перемешиванию осаждающегося материала, в отличие от крупных водных бассейнов. В пределах Кольского региона дон-

ные отложения из таких котловин изучались для характеристики палеогеографических обстановок [5, 10, 11, 14, 16, 19], для реконструкции перемещения береговой линии моря [3, 7, 12, 13, 18], для выявления катастрофических событий [8, 17].

На баренцевоморском побережье исследование озерных котловин проводилось для определения характера и скорости перемещения береговой линии мо-

Для цитирования: Толстоброва А. Н., Корсакова О. П., Толстобров Д. С. Позднеледниково-голоценовая стратиграфия донных отложений из котловин малых изолированных озер баренцевоморского побережья (Кольский регион) // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 26–37. DOI: 10.19110/geov.2022.6.3.

For citation: Tolstobrova A. N., Korsakova O. P., Tolstobrov D. S. The late-glacial – Holocene stratigraphy of bottom sediments from small isolated lakes in the Barents Sea coast (Kola region). Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 26–37, doi: 10.19110/geov.2022.6.3.



ря [12, 13, 18], в этих же работах уделялось внимание и стратиграфии осадков. После деградации последнего ледникового покрова в конце неоплейстоцена котловины представляли собой неровности морского дна, но в результате поднятия земной поверхности происходила их изоляция от морского бассейна. Таким образом, в разрезах осадков из изолированных озерных котловин в зависимости от условий их накопления последовательно представлены несколько фаций [2]. При этом в пределах одной фации по диатомовым и литологическим данным можно выделить несколько слоев с присущими им особенностями (состав и структура диатомовых комплексов, литологические характеристики, включения). Например, осадки одной фации могут включать несколько литологических слоев с различными текстурами и структурами, по диатомовым данным могут соответствовать водоему с различной степенью осолонения и т. д. В связи с этим возможно более дробное членение соответствующих осадочных последовательностей. Ранее такое членение было выполнено для осадков озер, расположенных на беломорском побережье Кольского полуострова и Карелии [4], и для внутренней части Кольского региона [9]. В данной работе представлены результаты анализа новых и опубликованных ранее литологических и диатомовых данных изучения донных отложений из озерных котловин на баренцевоморском побережье Кольского региона, для которых впервые выполнено дробное литолого-стратиграфическое разделение осадочных последовательностей на стратогены [6], т. е. литолого-стратиграфические единицы (ЛСЕ). Геохронологический их контроль осуществлен с использованием пока единичных предварительных радиоуглеродных (^{14}C) датировок. Такое разделение осадочных последовательностей, формирующихся в котловинах изолированных бассейнов, имеет важное корреляционное значение для выявления локальных и региональных неотектонических и палеогеографических особенностей в развитии разных частей побережий Фенноскандии.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили колонки донных отложений 8 малых озер из района пос.

Териберка, а также опубликованные данные по 12 малым озерам баренцевоморского побережья из районов г. Полярного [13], пос. Дальние Зеленцы [18, 19], губы Дроздовка [14] (рис. 1, а).

Колонки донных отложений были отобраны во время *полевых работ* в 2013, 2016, 2018 гг. при помощи переносного поршневого бура со льда. Бурение проводилось до коренных пород в наиболее глубоком плоскородном месте озера. Длина каждого керна составляла 1 м, диаметр 54 мм, керны отбирались с перекрытием в 10 см. В полевых условиях по визуально определяемым признакам (цвет, размер частиц, текстура, включения) выполнялось литологическое описание, фотодокументация и опробование осадков на диатомовый анализ и ^{14}C -датирование. Высотное положение озер в метрах над уровнем моря (м н. у. м.) определялось по картам масштаба 1 : 25 000 совместно с полевыми измерениями.

Обработка проб для *диатомового анализа* выполнена по стандартным методикам [1]. Для уточнения номенклатуры таксонов использовалась онлайн-база Algaebase [15]. Наибольшее внимание уделено отношению видов к солености. По этому признаку диатомовые водоросли разделены на морские (полигалобы), солоноватоводные (меzogалобы) и пресноводные (олигогалобы), которые, в свою очередь, подразделяются на галофилы (обитают в пресных водах с повышенным содержанием солей), индифференты (типичные пресноводные виды, однако могут заходить в слабосоленоватую воду) и галофобы (отрицательно относятся к малейшему повышению NaCl в воде).

Результаты и обсуждение

Литологическая характеристика донных отложений. В разрезах донных отложений исследованных озер установлена последовательность фациально-разнородных осадков, которая формировалась при миграции береговой линии Баренцева моря (рис. 1, б). Литологическая характеристика осадков представлена на рис. 2–4.

Базальная часть большинства изученных разрезов донных отложений представлена алевритом (озе-

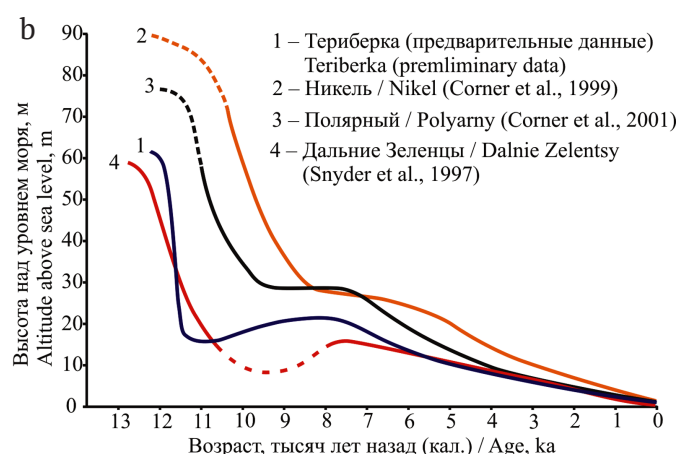
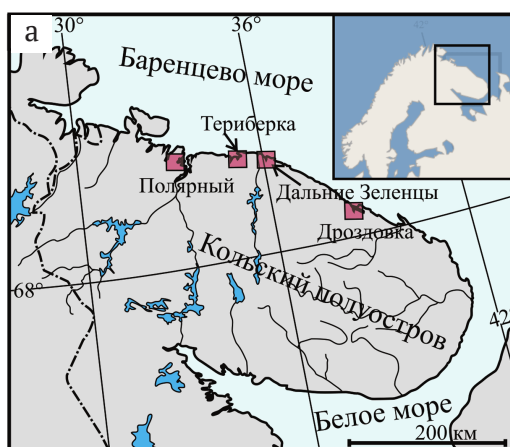


Рис. 1. Районы исследования (а) и кривые перемещения береговой линии моря (б)

Fig. 1. Study areas (a) and relative sea-level curves (b)

ра с абсолютными отметками уреза воды на высотах 4.6, 10.6, 17.0, 31.0, 39.0 м н. у. м. в районе пос. Териберка (рис. 3), озера с отметками 12.0, 17.0, 22.0, 28.5, 41.0 м н. у. м. в районе г. Полярный (рис. 2) и 7.0 м н. у. м. в районе пос. Дальние Зеленцы (рис. 4)) и/или песком (озера с отметками 26.0 и 48.5 м н. у. м. в районе г. Полярный (рис. 2) и 54.0 м н. у. м. в районе пос. Дальние Зеленцы (рис. 4)), реже глинами или глинистым алевритом (озера с отметками 47.0 и 58.8 м н. у. м. в районе пос. Териберка (рис. 2) и с отметками 22.0 и 41.0 м н. у. м. в районе пос. Дальние Зеленцы (рис. 4)), обычно содержащими зерна гравия и органику. Цвет осадков серый до серо-коричневого, темно-оливкового, зеленого. В большинстве озер эти осадки содержат раковины и обломки раковин морских моллюсков и макроостатки растений и могут быть отнесены к морской фации.

На предположительно морских осадках залегают отложения, обычно представленные алевритистой гиттией (озера с отметками 10.6, 31.0, 39.0 м н. у. м. в пос. Териберка (рис. 3), 12.0, 17.0, 22.0, 28.5 и 41.0 м н. у. м. в районе г. Полярный (рис. 2), 7.0, 22.0, 41.0 и 54.0 м н. у. м. в районе пос. Дальние Зеленцы (рис. 4)) либо гиттией с песком (озера с отметками 4.6, 17.0 и 22.5 м н. у. м. в районе пос. Териберка (рис. 3)). Цвет этих отложений — от серого до серо-зеленого, коричневого, часто с черными примазками органики. Как правило, количество минеральных частиц в алевритистой гиттии и в гиттии с песком уменьшается вверх по разрезам. Для этих осадков характерны слоистые и пятнистые текстуры, значительное увеличение количества органики по сравнению с нижележащими предположительно морскими осадками. В районе пос. Териберка (рис. 3), озере с отметкой 58.8 м н. у. м. глины перекрыты алевритом с песком и органическим материалом, которые выше переходят в алевритистую гиттию, а в озере с отметкой 47.0 м н. у. м. подобные осадки, предварительно отнесенные к транзитной зоне от морских к пресноводным, отсутствуют. Осадки транзитной зоны не выявлены в отложениях из озер с отметками 26.0 и 48.5 м н. у. м. в районе г. Полярный (рис. 2).

Верхняя часть осадочных последовательностей, по литологическим данным предварительно отнесенная к пресноводным отложениям, в разрезах осадков из всех озер представлена гиттией, часто с макроостатками растений. Цвет ее коричневый, темно-коричневый до черного, иногда до оливково-серого. В базальной части гиттии обычно присутствует примесь минеральных частиц, редко отдельные зерна гравия.

В разрезе отложений из озера, расположенного в районе пос. Териберка на высоте 17 м н. у. м., в толще пресноводных отложений обнаружены осадки, представленные слоистой гиттией с песком и остатками растений (рис. 3). По литологическим данным можно предположить, что в начале голоцена произошла изоляция котловины этого озера от моря, но в результате раннесреднеголоценовой трансгрессии Тапес котловина озера опять была заполнена морскими водами [8]. Кроме того, в разрезе донных отложений этой же озерной котловины обнаружено нарушенное залегание осадков, проявившееся в виде перемешивания песка и гиттии. Формирование такого слоя осадков свя-

зывается с проявлением катастрофических событий, возможно цунами [8, 17].

Результаты диатомового анализа донных отложений. На побережье Баренцева моря в базальной части разрезов в алеврите и/или песке отмечены либо крайне низкие концентрации диатомей, либо единичные створки диатомовых водорослей (рис. 2—4), принадлежащих как к морским и солоновато-водным (*Diploneis subcincta* (Schmidt) Cleve, *Pinnularia quadratarea* (Schmidt) Cleve, *Rhabdonema minutum* Kütz., *Trachyneis aspera* (Ehr.) Cleve и др.), так и к пресноводным видам (*Stauroforma exiguiformis* (Lange-Bert.) Flower, Jones et Round, *Tabularia fasciculata* (C. Agardh) Williams et Round, *Staurosirella martyi* (Hérib.) Morales et Manoylov, *Staurosirella pinnata* (Ehr.) Williams et Round), что, видимо, отвечает суровым условиям в приледниковоморском бассейне на начальных этапах формирования осадочных последовательностей.

Выше по разрезу в этом же алеврите и/или песке происходит увеличение концентрации створок диатомовых водорослей и их видового разнообразия среди морских и солоновато-водных видов. Чаще всего встречаются виды *Cocconeis scutellum* Ehr., *Hyalodiscus scoticus* (Kütz.) Grun., *Melosira moniliformis* (Link) C. Agardh, *Paralia sulcata* (Ehr.) Kütz., *Diploneis didyma* (Ehr.) Ehr., *Pinnularia quadratarea*, *Plagiogramma staurophorum* (Greg.) Heib. (рис. 2—4).

В базальной части разреза отложений из озера с отметкой 12.0 м н. у. м. в районе г. Полярный (рис. 2) преобладают олигогалобы-индифференты (в частности, *Aulacoseira alpigena* (Grun.) Krammer, *Aulacoseira distans* (Ehr.) Simons.), что объясняется большим поступлением талой пресной воды в прогляциальный морской бассейн [13]. Выше этих морских осадков в данном разрезе наблюдается классический переход от морских условий седиментации к пресноводным [12, 13, 18] с преобладанием пресноводных видов над морскими и солоновато-водными в осадках транзитной фации и исключительно пресноводными видами в гиттии [12].

В районе губы Дроздовка (рис. 1, а) в оз. Солдатское с отметкой уреза воды 15.4 м н. у. м. в песке базальной части разреза выявлены исключительно пресноводные виды диатомовых водорослей, среди которых преобладают *Eunotia praerupta* Ehr., *Meridion circulare* (Greville) C. Agardh, *Aulacoseira lirata* (Ehr.) Ross, *Fragilariforma virescens* (Ralfs) Williams et Round, *Staurosira venter* (Ehr.) Cleve et Möller (рис. 4). Морские осадки и осадки транзитной зоны от морских к озерным условиям седиментации залегают ниже песка. Они не были вскрыты бурением, что в данном районе возможно, т. к. верхняя морская граница здесь реконструирована на отметке 22.9 м н. у. м. [14].

В алевритистой гиттии и гиттии с песком, перекрывающих базальный алеврит в изученных разрезах, происходит смена диатомовых комплексов, характеризующая переходную стадию от морских к пресноводным условиям (рис. 2—4). В нижней части алевритистой гиттии доминируют мезогалобы *Paralia sulcata*, *Diploneis didyma*, *Diploneis smithii* (Bréb.) Cleve, *Mastogloia smithii* Thwaites ex Smith, *Amphora commutata* Grun., *Rhabdonema minutum* и другие. Полигалобы занимают подчиненное положение, они представлены *Diploneis subcincta*, *Pinnularia quadratarea*, *Plagiogramma*

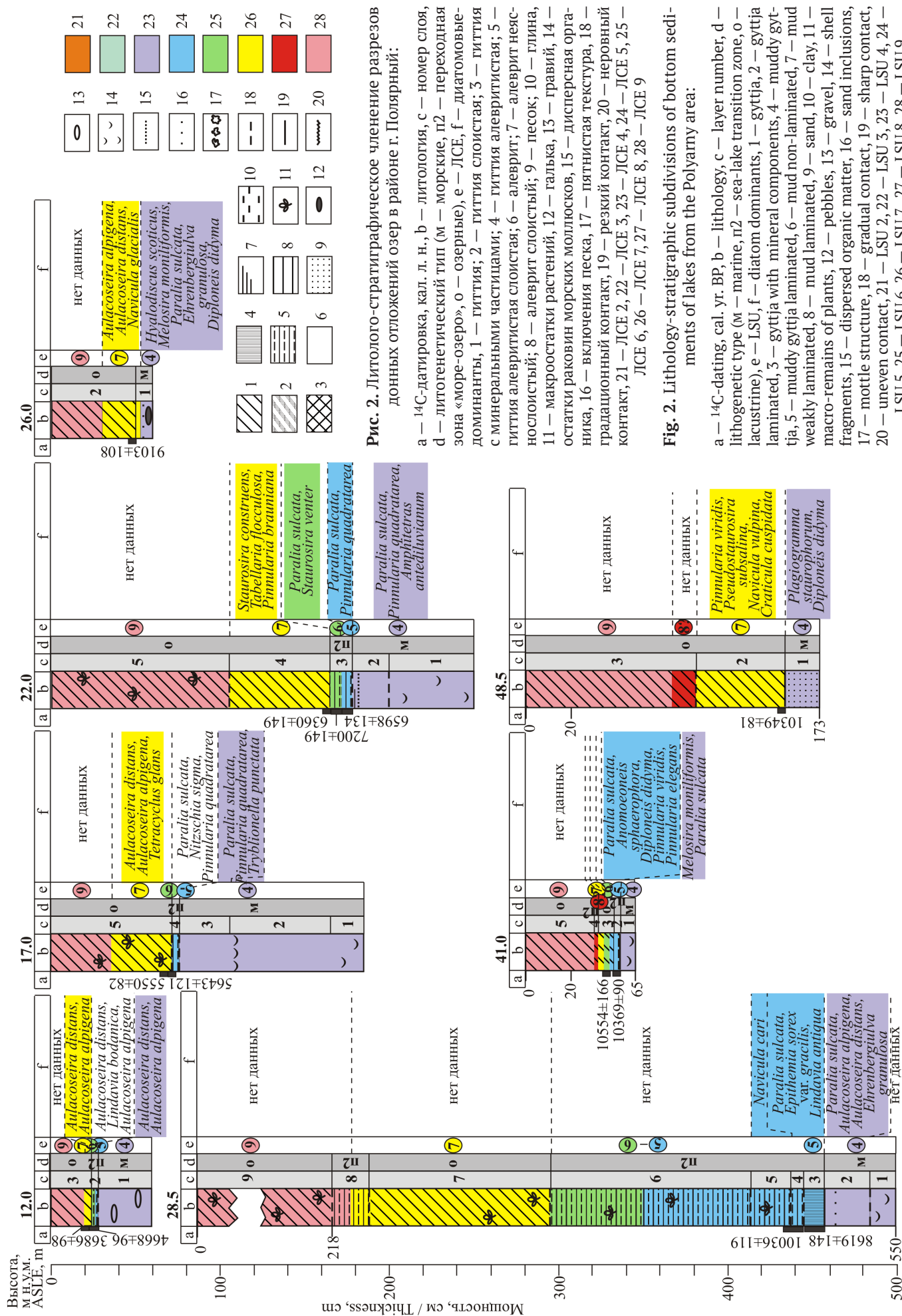


Рис. 2. Литолого-стратиграфическое членение разрезов донных отложений озер в районе г. Полярный:

a — ¹⁴C-датировка, кал. л. н., b — литология, с — номер слоя, d — литогенетический тип (м — морской, п2 — переходная зона «море-озеро», о — озерные), е — ЛСЕ, ф — диаграммы-доминанты, 1 — гиттия; 2 — гиттия слоистая; 3 — гиттия с минеральными частицами; 4 — гиттия алевролитовая; 5 — гиттия алевролитовая слоистая; 6 — алевролит; 7 — алевролит неслоистый; 8 — алевролит слоистый; 9 — песок; 10 — глина, 11 — макроостатки растений, 12 — галька, 13 — гравий, 14 — остатки раковин морских моллюсков, 15 — дисперсная органика, 16 — включения песка, 17 — пятнистая текстура, 18 — градиционный контакт, 19 — резкий контакт, 20 — неровный контакт, 21 — ЛСЕ 2, 22 — ЛСЕ 3, 23 — ЛСЕ 4, 24 — ЛСЕ 5, 25 — ЛСЕ 6, 26 — ЛСЕ 7, 27 — ЛСЕ 8, 28 — ЛСЕ 9

Fig. 2. Lithology-stratigraphic subdivisions of bottom sediments of lakes from the Polyarny area:

a — ¹⁴C-dating, cal. yr. BP, b — lithology, c — layer number, d — lithogenetic type (m — marine, p2 — sea-lake transition zone, o — lacustrine), e — LSU, f — diatom dominants, 1 — gyttja, 2 — gyttja laminated, 3 — gyttja with mineral components, 4 — muddy gyttja, 5 — muddy gyttja laminated, 6 — mud non-laminated, 7 — mud weakly laminated, 8 — mud laminated, 9 — sand, 10 — clay, 11 — macro-remains of plants, 12 — pebbles, 13 — gravel, 14 — shell fragments, 15 — dispersed organic matter, 16 — sand inclusions, 17 — mottled structure, 18 — gradual contact, 19 — sharp contact, 20 — uneven contact, 21 — LSU 2, 22 — LSU 3, 23 — LSU 4, 24 — LSU 5, 25 — LSU 6, 26 — LSU 7, 27 — LSU 8, 28 — LSU 9

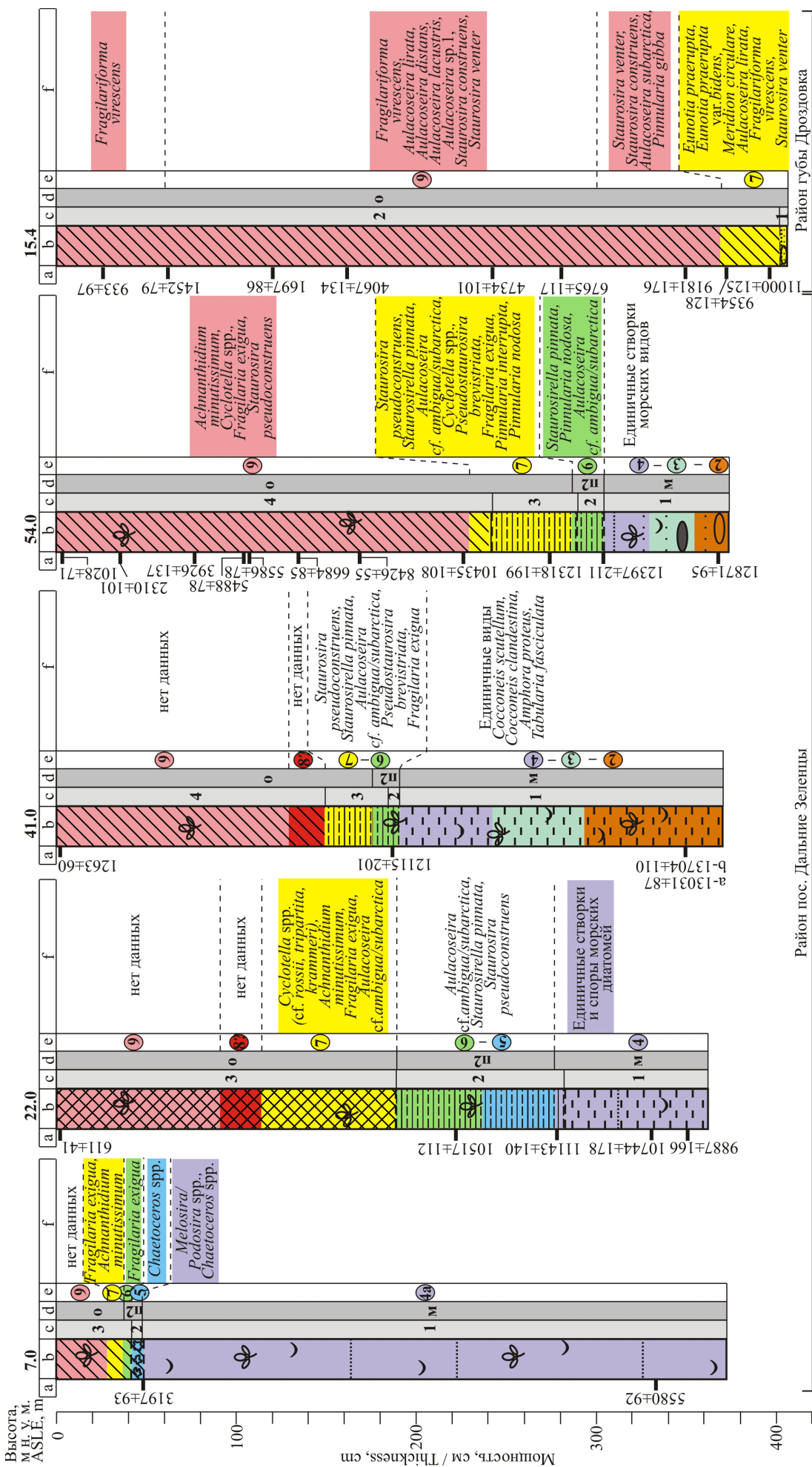


Рис. 4. Литолого-стратиграфическое расчленение разрезов донных отложений озер в районе пос. Дальние Зеленцы и губы Дроздовка. Условные обозначения указаны на рис. 2

Fig. 4. Lithology-stratigraphic subdivisions of bottom sediments of lakes from the Dainie Zelentsy and Drodovka Bay areas. For the legend see Fig. 2

staurophorum и некоторыми другими. Присутствуют в небольшом количестве олигогалобы, в основном галофилы (*Anomoeoneis sphaerophora* Pfitz., *Nitzschia sigma* (Kütz.) W.Sm., *Pantocsekiella schumannii* (Grun.) Kiss et Ács и др.) и индифференты (*Aulacoseira* spp., *Pantocsekiella rossii* (Håkans.) Kiss et Ács и др.). В верхней части алевритистой гиттии постепенно исчезают полигалобы и мезогалобы, они замещаются олигогалолами. В большинстве озер в большом количестве появляются виды *Fragilaria sensu lato*, которые представлены галофильными (*Pseudostaurosira subsalina* (Hust.) Morales, *Staurosirella pinnata*) и индифферентными видами (*Stauroforma exiguiiformis*, *Staurosira venter*, *Staurosira construens* Ehr., *Staurosirella martyi*, *Pseudostaurosira brevistriata* (Grun.) Williams et Round).

В озерах с урезом воды на отметках 17.0, 39.0 м н. у. м. в районе пос. Териберка (рис. 3), а также в озерах на отметках 41.0 и 54.0 м н. у. м. в районе пос. Дальние Зеленцы (рис. 4), по данным диатомового анализа, наблюдается относительно резкий переход от морских осадков к пресноводным. Концентрация диатомей в пресноводной гиттии на несколько порядков выше, чем в подстилающих морских осадках. Отсутствует зона с преобладанием мезогалобных видов. Алевритистая гиттия содержит большое количество галофилов и индифферентов, в частности *Fragilaria sensu lato*. Все это свидетельствует о быстрой смене морских условий седиментации на пресноводные.

В озерах с отметками уреза воды 26.0 и 48.5 м н. у. м. в районе г. Полярный (рис. 2) и в озере с отметкой 47.0 м н. у. м. в районе пос. Териберка (рис. 3) отложения, содержащие морские диатомовые водоросли, перекрыты гиттией. В гиттии абсолютное господство принадлежит пресноводным видам — олигогалолам. В этих разрезах осадки переходной зоны отсутствуют, что связано либо с быстрой регрессией береговой линии моря (рис. 1, b), либо с размывом отложений транзитной фации.

Верхняя часть абсолютно всех изученных на баренцевоморском побережье разрезов, представленных гиттией, содержит исключительно пресноводную диатомовую флору с преобладанием индифферентов и галофобов. Причем в нижней части гиттии среди диатомовых водорослей доминируют различные фрагилариоидные виды: *Fragilariforma* spp., *Stauroforma* spp., *Pseudostaurosira* spp., *Staurosira* spp., *Staurosirella* spp. (рис. 2—4). Вверх по разрезу они постепенно замещаются другими разнообразными пресноводными диатомеями. Их видовой состав зависит от множества факторов (климатических, геоморфологических, геологических), влияющих на водоем. В большей степени представлены таксоны из родов *Aulacoseira*, *Cyclotella*, *Pantocsekiella*, *Pinnularia*, *Tabellaria*.

В разрезе осадков из озера с отметкой 17.0 м н. у. м. в районе пос. Териберка, как указывалось выше, после установления пресноводного режима, произошло повторное соединение данной котловины с морем в ходе трансгрессии Тапес, что отражают данные диатомового анализа [8]. В тонкослойной гиттии с песком и остатками растений, вскрытой выше пресноводной гиттии, выявлены мезогалобы (*Amphora commutata*, *Cocconeis scutellum*, *Halamphora coffeaeformis* (C. Agardh) Levkov, *Navicula peregrina* (Ehr.) Kütz., *Mastogloia* spp., *Paralia sulcata*, *Rhopalodia musculus*

(Kütz.) O. Mull. и др.), которые составляют 5—9 %, и единичные полигалобы. Доминирующий комплекс представлен галофилами и индифферентами, причем вновь отмечается вспышка развития видов *Fragilaria sensu lato* (рис. 3). В этой же котловине в гиттии обнаружены осадки с нарушенным залеганием, представленные перемешиванием песка и гиттии, в которых зафиксировано резкое увеличение морских и солоновато-водных видов диатомей при доминировании последних в основном за счет планктонно-бентосного вида *Paralia sulcata* (до 50—70% от общего числа видов). Кроме того, среди мезогалобов отмечены также *Navicula peregrina*, *Mastogloia elliptica* (C.Ag.) Cleve и др., а среди полигалобов — бентосные виды *Diploneis subcincta*, *Plagiogramma staurophorum* и др. (рис. 3). Такой состав диатомовой флоры, литология осадков, вероятно, свидетельствуют о формировании данного слоя в результате воздействия цунами [8, 17].

Литолого-стратиграфическая характеристика донных отложений малых изолированных бассейнов. Донные отложения изолированных бассейнов северо-восточной части Фенноскандинавского щита представлены осадочной последовательностью литолого-стратиграфических единиц (ЛСЕ), которые относятся к морфолитостратиграфическим подразделениям — стратогенам, т. к. образуются в озерных котловинах и соотносятся с осадками разных литогенетических типов [4, 6]. Полная их последовательность представлена пресноводными (ЛСЕ 1) и солоноватоводными (ЛСЕ 2) отложениями приледникового водоема; солоноватоводными позднеледниковыми осадками (ЛСЕ 3); осадками моря или крупного пресноводного (ЛСЕ 4) водоема; осадками водоема-залива, отличающегося от морского или крупного пресноводного бассейна (ЛСЕ 5); осадками меромиктического озера (ЛСЕ 6); пресноводными отложениями водоема береговой зоны моря или крупного пресноводного водоема (ЛСЕ 7); пресноводными осадками озера с повышенным содержанием минерального вещества, образовавшимися во время максимального развития голоценовой морской трансгрессии Тапес (ЛСЕ 8); голоценовыми пресноводными озерными осадками (ЛСЕ-9). Принадлежность слоев к конкретным ЛСЕ определяется по комплексу литологических и палеонтологических признаков, в первую очередь составу диатомовых водорослей. Основные признаки ЛСЕ, характерные для морских побережий, представлены в таблице 1. Общая стратиграфическая схема, отражающая последовательности ЛСЕ для различных участков баренцевоморского побережья Кольского региона, показана на рисунке 5.

В результате анализа данных на баренцевоморском побережье пресноводные осадки приледникового водоема (ЛСЕ 1) не обнаружены. Это связано с тем, что вслед за отступающим краем льда в пределы континента проникали морские воды, испытывающие опресняющее воздействие талых ледниковых вод. Соответственно, в котловинах, которые освобождались от ледникового покрова, с самого начала происходило формирование солоновато-водных осадков.

В окрестностях пос. Териберка (рис. 1, а) в разрезе осадков из озера с высотной отметкой 39.0 м н. у. м. представлен наиболее полный набор ЛСЕ: 2–3–4–6–7–8(?)–9, в котором отсутствуют осадки водоема-за-



Таблица 1. Признаки ЛСЕ донных отложений малых изолированных бассейнов
Table 1. Main characteristics of LSU in bottom sediments of small isolated basins

Литолого-стратиграфические единицы (ЛСЕ) Lithology-stratigraphic units (LSU)	Основные характеристики ЛСЕ / Main characteristics of LSU
Голоценовые пресноводные озерные осадки ЛСЕ 9 Holocene freshwater lacustrine sediments LSU 9	Гиттия. Исключительно пресноводная диатомовая флора с доминированием индифферентов и галофобов Gyttia. Exclusively freshwater diatom flora dominated by indifferents and halophobes
Осадки пресноводного водоема с повышенной минерализацией воды ЛСЕ 8 Sediments of a freshwater reservoir with increased water salinity LSU 8	Гиттия, часто с минеральными частицами. Резкое увеличение галофилов и появление мезогалобов, отмечаемое на фоне преобладающих в составе диатомового комплекса олигогалобов Gyttia, often with mineral particles. A sharp increase in halophiles and the appearance of mesohalobes, noted against the background of oligohalobes predominating in the composition of the diatom complex
Пресноводные отложения водоема береговой зоны моря ЛСЕ 7 Freshwater sediments of the reservoir of the coastal zone of the sea LSU 7	Гиттия, часто с примесью минеральных частиц и макроостатками растений. Среди диатомей в осадках абсолютное господство принадлежит олигогалобам, виды <i>Fragilaria sensu lato</i> постепенно замещаются другими различными пресноводными диатомеями Gyttia, often with an admixture of mineral particles and macro-remains of plants. Among the diatoms in the sediments, the absolute dominance belongs to the oligohalobes; the species <i>Fragilaria sensu lato</i> are gradually replaced by various other freshwater diatoms
Осадки меромиктического озера ЛСЕ 6 Sediments of the meromictic lake LSU 6	Гиттия алевритистая или гиттия с минеральной частью. Характерна слоистость. Постепенно исчезают полигалобы и мезогалобы, доминируют олигогалобы, в большинстве озер в большом количестве появляются <i>Fragilaria sensu lato</i> Silty gyttia or gyttia with a mineral part. Lamination is characteristic. Polyhalobes and mesohalobes gradually disappear, oligohalobes dominate, and <i>Fragilaria sensu lato</i> appears in large numbers in most lakes
Осадки водоема-залива, отчленяющегося от морского бассейна ЛСЕ 5 Sediments of a reservoir-bay detached from the marine basin LSU 5	Слоистый алеврит, алевритистая гиттия, значительное количество органики. Слоистые и пятнистые текстуры. Преобладание солоноватоводных (мезогалобов) видов диатомей, наличие морских и пресноводных Laminated silt, silty gyttia, a significant amount of organic matter. Laminated and spotty textures. The predominance of brackishwater (mesohalobes) species of diatoms, the presence of marine and freshwater
Морские отложения ЛСЕ 4 Marine sediments LSU 4	Алеврит и/или песок, иногда с включениями гальки и гравия. Наличие раковин моллюсков. Доминирование в осадках морских и солоновато-водных (полигалобов и мезогалобов) видов диатомовых водорослей Silt and/or sand, sometimes with inclusions of pebbles and gravel. Presence of mollusk shells. Dominance of marine and brackish water (polyhalobes and mesohalobes) species of diatoms in sediments
Позднеледниковые солоноватоводные отложения ЛСЕ 3 Late glacial brackish deposits LSU 3	Песок и алеврит с органическим материалом. Появление макроостатков водных растений, отчетливые тонкослоистые и пятнистые текстуры. Преобладание галофильных и мезогалобных видов диатомовых Sand and silt with organic material. Occurrence of macro-remains of aquatic plants, distinct thin-layered and spotty textures. The predominance of halophilic and mesohalobic diatom species
Солоноватоводные отложения приледникового водоема ЛСЕ 2 Brackish-water sediments of the near-glacial reservoir LSU 2	Алеврит и песок, реже глины. Низкое содержание органики. Слоистость. Содержат единичные диатомеи, принадлежащие к галофилам, полигалобам и мезогалобам, обычно при доминировании последних Silt and sand, rarely clay. Low organic content. Lamination. They contain single diatoms belonging to halophiles, polyhalobes and mesohalobes, usually with the dominance of the latter
Пресноводные отложения приледникового водоема ЛСЕ 1 Freshwater sediments of the near-glacial reservoir LSU 1	Ленточные глины, неслоистые глины, реже алеврит, иногда с включениями гравия/песка. Диатомовые водоросли отсутствуют, либо встречаются единичные створки и обломки пресноводных видов Banded clays, unlamined clays, rarely silt, sometimes with gravel/sand inclusions. Diatoms are absent, or single valves and fragments of freshwater species are found

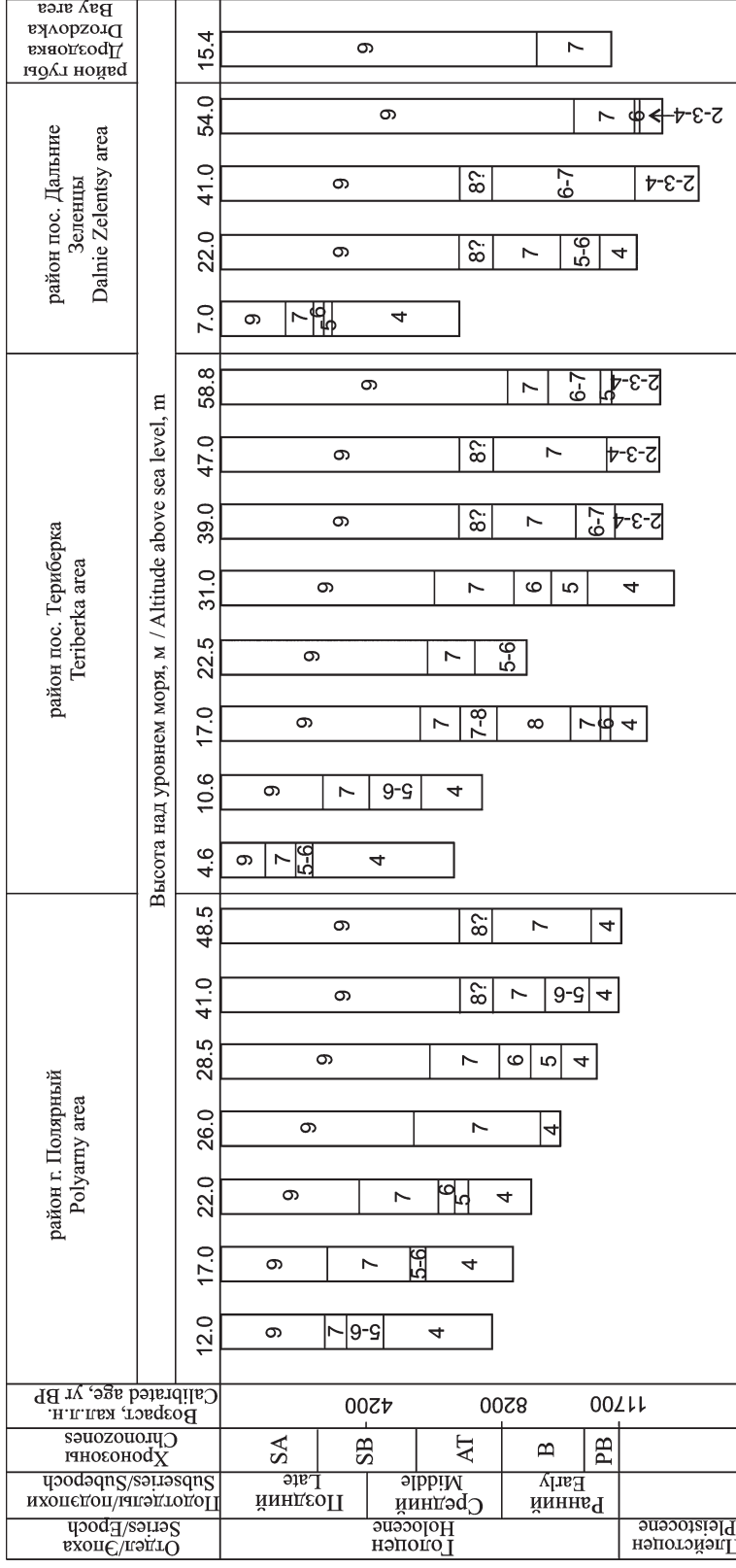


Рис. 5. Стратиграфическая схема, отражающая последовательности ЛСЕ (указаны цифрами в соответствии с табл. 1) для различных участков баренцевоморского побережья Кольского региона.

Хронозоны: PB — пребореал, B — бореал, AT — атлантикум, SB — суббореал, SA — субатлантикум

Fig. 5. Stratigraphy scheme of LSU successions (shown by number according to Table 1) for different locations in the Barents Sea coast of the Kola Peninsula

Chronozones: PB — Preboreal, B — Boreal, AT — Atlanticum, SB — Subboreal, SA — Subatlanticum



лива, отчленяющегося от морского бассейна (ЛСЕ 5) (рис. 3, 5). Здесь же осадки изолирующих водоемов полностью отсутствуют в озере с отметкой 47.0 м н. у. м. и набором ЛСЕ 2–3–4–7–8(?)–9, что, вероятно, было вызвано либо быстрой регрессией береговой линии моря, когда соответствующие отложения транзитной зоны не успели сформироваться, либо их более поздним размывом в прибрежных условиях. Пресноводные осадки водоема с повышенной минерализацией воды, соответствующие развитию трансгрессии Тапес (ЛСЕ 8), установлены в разрезах осадков из этих озер предположительно, т. к. они неотчетливо выделяются по литологическим признакам, а диатомовые данные пока отсутствуют. В озере с отметкой 58.8 м н. у. м. (рис. 3, 5) установленная последовательность ЛСЕ имеет вид: 2–3–4–5–6–7–9. В ней также не установлены осадки, соответствующие трансгрессии Тапес, которая, судя по кривой перемещения береговой линии моря в районе пос. Териберка (рис. 1, б), не могла оказывать существенного влияния на экосистему озер, расположенных на таких высотных отметках. В противоположность этому, в осадках озера с отметкой 17.0 м н. у. м. установлена последовательность ЛСЕ 4–6–7–8–9, где осадки трансгрессии Тапес выражены и по литологии, и по данным диатомового анализа. В этой котловине не выявлены осадки отчленяющегося водоема (ЛСЕ 5), что, возможно, связано с быстрой регрессией береговой линии моря. В котловинах, расположенных на отметках 4.6, 10.6 и 31.0 м н. у. м., осадочные последовательности включают набор ЛСЕ 4–5–6–7–9. В нем также осадки ЛСЕ 8 не выражены, т. к. в непосредственной близости к береговой линии моря до трансгрессии Тапес или в ходе этой трансгрессии осадки ЛСЕ 5, 6 и 7 накапливались более длительное время. В озере с отметкой 22.5 м н. у. м. установлена последовательность ЛСЕ 5–6–7–9, в которой морские осадки, формирующие ЛСЕ 4, либо были размывы, либо осадконакопление в данной котловине началось, когда береговая линия моря находилась примерно на одной отметке с порогом стока.

В районе г. Полярный (рис. 1, а) в разрезах отложений из озер с отметками 12.0, 17.0, 22.0 и 28.5 м н. у. м. последовательность ЛСЕ имеет вид: 4–5–6–7–9 (рис. 2, 5). В озере с отметкой 12.0 м н. у. м., несмотря на высокий процент содержания пресноводных видов, выделен регрессивный набор литогенетических типов осадков [13], поэтому последовательность представлена ЛСЕ 4–5–6–7–9. В озере с отметками 41.0 м и 48.5 м н. у. м. в органогенной толще выделяется и ЛСЕ 8, что согласуется с темпом перемещения береговой линии Баренцева моря в данном районе [13] (рис. 1, б). В разрезах донных отложений озер на отметках 26.0 и 48.5 м н. у. м. отсутствуют осадки отчленяющегося водоема-залива (ЛСЕ 5) и меромиктического озера (ЛСЕ 6), что можно объяснить быстрой регрессией береговой линии моря, в результате чего последовательности имеют вид: 4–7–9 и 4–7–8–9 соответственно.

В районе пос. Дальние Зеленцы (рис. 1, а) наиболее полный набор ЛСЕ: 2–3–4–6–7–8?–9 установлен в осадках озера с отметкой 41.0 м н. у. м. (рис. 4, 5). В этой котловине не выявлены осадки отчленяющегося водоема ЛСЕ 5, так как по диатомовым данным осадки с единичными морскими видами сразу перекрываются алевритистой гиттией, содержащей большое ко-

личество пресноводно-солонатоводных и пресноводных видов. Осадки с повышенной минерализацией воды (ЛСЕ 8) выделены здесь условно. Судя по кривой перемещения береговой линии моря (рис. 1, б), их можно выделить, но диатомовый анализ этих отложений не проводился. При этом в осадках озера с отметкой 54.0 м н. у. м. ЛСЕ 8 по диатомовым данным отсутствуют (рис. 4, 5). В разрезе осадков озера с отметкой 22.0 м н. у. м. последовательность ЛСЕ имеет вид: 4–5–6–7–8(?)–9, а в озере с отметкой 7.0 м н. у. м. — 4–5–6–7–9. В последнем случае осадки ЛСЕ 8 не формировались, т. к. изоляция происходила во время трансгрессии Тапес и здесь более длительное время формировались отложения ЛСЕ 5, ЛСЕ 6 или ЛСЕ 7.

В районе губы Дроздовка (рис. 1, а), в разрезе отложений из оз. Солдатское с отметкой 15.4 м н. у. м. выявлены только пресноводные озерные осадки ЛСЕ 7–9 (рис. 4, 5). Возможно, что морские осадки ЛСЕ 4 и осадки отчленяющегося водоема ЛСЕ 5–6 не были отобраны при бурении, т. к. верхняя морская граница в данном районе находится на отметке 22.9 м н. у. м. [14].

Выводы

На основе полученных новых данных, а также опубликованных материалов было выполнено стратиграфическое расчленение осадочных последовательностей, образующихся в изолированных бассейнах баренцевоморского побережья Кольского региона. В них в соответствии с генетическими особенностями соответствующих осадков, накапливающихся в озерных котловинах, в качестве стратогенов выделены литолого-стратиграфические единицы (ЛСЕ).

Набор литолого-стратиграфических единиц, выделенных в каждой озерной котловине баренцевоморского побережья, вещественный состав и возраст слагающих их осадков зависит от конкретной геоморфологической, геологической и палеогеографической обстановки, в которой находится котловина. При этом общая схема морфолитостратиграфических единиц сохраняется.

В разрезах осадков из изолированных водоемов на побережье Баренцева моря установлены только усеченные последовательности ЛСЕ, из которых выпадают осадки пресноводного приледникового водоема (ЛСЕ 1). Это связано с тем, что вслед за отступающим краем льда в пределы континента проникали морские воды, испытывавшие опресняющее влияние талых вод, и в котловинах осадконакопление начиналось в условиях солонатоводного бассейна. При быстрой регрессии береговой линии моря во время изоляции котловины осадки водоема-залива и меромиктического озера (ЛСЕ 5 и 6) не успевают сформироваться. В озерах, отделившихся от родительского водоема после раннесреднеголоценовой трансгрессии Тапес, отсутствуют осадки пресноводного озера с повышенной минерализацией воды (ЛСЕ 8).

Авторы благодарят Л. Я. Казан, Д. Б. Денисова, А. Л. Косова за помощь и полезные консультации.

Работа выполнена в Геологическом институте КНЦ РАН в рамках темы НИР АААА-А19-119100290145-3 при частичной поддержке Минпросвещения России (проект № FSZN-2020-0016).



Литература

1. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.
2. Колька В. В., Евзеров В. Я., Мёллер Я., Корнер Д. Последледниковые гляциоизостатические движения на северо-востоке Балтийского щита // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Кольского полуострова. Апатиты: КНЦ РАН. 2005. С. 15–25.
3. Колька В. В., Евзеров В. Я., Мёллер Я. Й., Корнер Г. Д. Перемещение уровня моря в позднем плейстоцене — голоцене и стратиграфия донных осадков изолированных озер на южном берегу Кольского полуострова, в районе поселка Умба // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 73–88.
4. Корсакова О. П., Колька В. В., Толстоброва А. Н., Лаврова Н. Б., Толстобров Д. С., Шелехова Т. С. Литология и поздне-последниковая стратиграфия донных отложений из котловин изолированных бассейнов побережья Белого моря (на примере малого озера из района поселка Чупа, северная Карелия) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2016. Т. 24. №3. С. 81–101.
5. Косова А. Л., Денисов Д. Б., Николаева С. Б. Развитие экосистемы озера Тридцатка (Мурманская область) в голоцене по результатам диатомового анализа донных отложений // Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. Океанология. 2018. № 9. С. 77–91.
6. Стратиграфический кодекс России. Изд-е 3-е, испр. и доп. СПб.: Изд. ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.
7. Толстобров Д. С., Толстоброва А. Н., Колька В. В., Корсакова О. П. Последниковое поднятие земной коры в северо-западной части Кольского региона // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18. № 2. С. 295–306.
8. Толстобров Д. С., Толстоброва А. Н., Колька В. В., Корсакова О. П., Субетто Д. А. Возможные следы голоценовых цунами в озёрных донных отложениях в районе пос. Териберка (Кольский полуостров, Россия) // Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. Океанология. 2018. № 9. С. 92–102.
9. Толстоброва А. Н., Корсакова О. П. Стратиграфия и особенности формирования донных отложений изолированных бассейнов северо-восточной части Фенно-скандинавского щита (по литологическим и диатомовым данным) // Материалы XXVII Молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова. Апатиты, 2016. С. 205–209.
10. Толстоброва А. Н., Толстобров Д. С., Колька В. В., Корсакова О. П. История развития озера Осинового (Кольский регион) в поздне-последниковое время по материалам диатомового анализа донных отложений // Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. 2016. № 5. С. 106–116.
11. Шилова О. С., Романенко Ф. А., Колька В. В., Денисов Д. Б. Изменения природной среды в Северных Хибинах (Кольский п-ов) в голоцене по данным диатомового анализа озерных отложений // Геоморфология. 2019. № 3. С. 91–101.
12. Corner G. D., Yevzerov V. Y., Kolka V. V., Møller J. J. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change at the Norwegian–Russian border north of Nikel, northwest Russia // Boreas. 1999. V. 28. P. 146–166.
13. Corner G. D., Kolka V. V., Yevzerov V. Ya., Møller J. J. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia // Global and Planetary Change. 2001. V. 31. P. 153–175.

14. Grönlund. T., Kauppila T. Holocene history of Lake Soldatskoje (Kola Peninsula, Russia) inferred from sedimentary diatom assemblages // Boreas. 2002. V. 31. P. 273–284.
15. Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 08.04.2022).
16. Korsakova O., Kolka V., Tolstobrov D., Savelieva L., Kosova A., Petrov A., Semyonova L. Holocene environments on the west-central Kola Peninsula (north-west Russia): lithology, chronology and biostratigraphy records from Lake Tikozero and a neighbouring bog. // J. Quaternary Sci. 2022. P. 1–13.
17. Nikolaeva S., Tolstobrov D., Tolstobrova A. Disturbances in the primary stratigraphy of lake sediments on the Murmansk coast (Russia): their identification and relationship with catastrophic events // Baltica. 2019. V. 32. No 2. P. 156–169.
18. Snyder J. A., Forman S. L., Mode W. N., Tarasov G. A. Postglacial relative sea-level history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, northcentral Kola Peninsula, Russia // Boreas. V. 26. 1997. P. 329–346.
19. Snyder J. A., MacDonald G. M., Forman S. L., Tarasov G. A., Mode W. N. Postglacial climate and vegetation history, north-central Kola Peninsula, Russia: pollen and diatom records from Lake Yarnyshnoe-3 // Boreas. 2000. V. 29. P. 261–271.

References

1. Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennyye) (Diatoms of the USSR (fossil and modern)). V. 1, Leningrad: Nauka, 1974, 403 p.
2. Kolka V. V., Yevzerov V. Ya., Møller Ya., Korner D. Poslednikovyye glyatsioizostaticheskiye dvizheniya na severo-vostoke Baltiyskogo shchita (Postglacial glacioisostatic movements in the northeast of the Baltic Shield). *Novyye dannyye po geologii i poleznym iskopayemym Kol'skogo poluostrova* (New data on geology and minerals of the Kola Peninsula). Apatity: KSC RAS, 2005, pp. 15–25.
3. Kolka V. V., Evzerov V. Ya., Møller Ya. Y., Korner G. D. *Peremeshcheniye urovnya morya v pozdnem pleystotsene — golotsene i stratigrafiya donnykh osadkov izolirovannykh ozer na yuzhnom beregu Kol'skogo poluostrova, v rayone poselka Umba* (Sea level change in the late Pleistocene — Holocene and stratigraphy of bottom sediments of isolated lakes on the southern coast of the Kola Peninsula, near the village of Umba). Proceedings of RAS, Ser. Geogr., 2013, No. 1, pp. 73–88.
4. Korsakova O. P., Kolka V. V., Tolstobrova A. N., Lavrova N. B., Tolstobrov D. S., Shelekhova T. S. *Litologiya i pozdne-postlednikovaia stratigrafiya donnykh otlozhenii iz kotlovin izolirovannykh basseinov poberezhia Belogo moria (na primere malogo ozera iz raiona poselka Chupa, severnaia Kareliia)* (Lithology and late postglacial stratigraphy of bottom sediments in isolated basins of the White Sea coast exemplified by a small lake in the Chupa settlement area (Northern Karelia)). Stratigraphy and Geological Correlation, 2016, V. 24, No. 3, pp. 294–312.
5. Kosova A. L., Denisov D. B., Nikolaeva S. B. *Razvitiye ekosistemy ozera Tridtsatka (Murmanskaya oblast') v golotsene po rezul'tatam diatomovogo analiza donnykh otlozheniy* (The ecosystem of the lake Tridzatka (Murmansk region) during the holocene according to the results of diatom analysis of bottom). Transactions of Karelian SC RAS, Limnology, Oceanology, 2018, No. 9, pp. 77–91.
6. Stratigraphic Code of Russia. 3rd edition. St. Petersburg: VSEGEI Press, 2019, 96 p.
7. Tolstobrov D. S., Tolstobrova A. N., Kolka V. V., Korsakova O. P. *Postlednikovoye podnyatiye zemnoy kory v severo-zapadnoy*



chasti Kolskogo regiona (Postglacial uplift of the Earth crust in the north-western part of the Kola region). Vestnik of MSTU, 2015, V. 18, No. 2, pp. 295–306.

8. Tolstobrov D. S., Tolstobrova A. N., Kolka V. V., Korsakova O. P., Subetto D. A. *Vozmozhnyye sledy golotsenovykh tsunami v ozornykh donnykh otlozheniyakh v rayone pos. Teriberka (Kol'skiy poluostrov, Rossiya)* (Putative records of the Holocene tsunami in lacustrine bottom sediments near the Teriberka settlement (Kola Peninsula, Russia)). Transactions of Karelian RC RAS. Limnology. Oceanology, 2018, No. 9, pp. 92–102.

9. Tolstobrova A. N., Korsakova O. P. *Stratigrafiya i osobennosti formirovaniya donnykh otlozheniy izolirovannykh basseynov severo-vostochnoy chasti Fennoskandinavskogo shchita (po litologicheskim i diatomovym dannym)* (Stratigraphy and formation features of bottom sediments in isolated basins of the northeastern part of the Fennoscandian Shield (based on lithological and diatom data)). Proceedings of the 27th Youth Scientific School-Conference dedicated to the memory of Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences K. O. Kratz and Academician of the RAS F. P. Mitrofanova. Apatity, 2016, pp. 205–209.

10. Tolstobrova A. N., Tolstobrov D. S., Kolka V. V., Korsakova O. P. *Istoriya razvitiya ozera Osinovogo (Kol'skiy region) v pozdne-postlednikovoye vremya po materialam diatomovogo analiza donnykh otlozheniy* (Late glacial and postglacial history of lake Osinovoye (Kola region) inferred from sedimentary diatom assemblages). Transactions of Karelian RC RAS. Limnology, 2016, No. 5, pp. 106–116.

11. Shilova O. S., Romanenko F. A., Kolka V. V., Denisov D. B. *Izmeneniya prirodnoy sredy v Severnykh Khibinakh (Kolskiy p-ov) v golotsene po dannym diatomovogo analiza ozernykh otlozheniy* (Holocene environmental changes in the northern Khibiny Mountains (Kola Peninsula) inferred by diatom analysis

of lake sediments). Geomorfologiya, 2019, No. 3, pp. 91–101.

12. Corner G. D., Yevzerov V. Y., Kolka V. V., Møller J. J. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change at the Norwegian–Russian border north of Nikel, northwest Russia. Boreas, 1999, V. 28, pp. 146–166.

13. Corner G. D., Kolka V. V., Yevzerov V. Ya., Møller J. J. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia. Global and Planetary Change, 2001, V. 31, pp. 153–175.

14. Grönlund T., Kauppila T. Holocene history of Lake Soldatskoje (Kola Peninsula, Russia) inferred from sedimentary diatom assemblages. Boreas, 2002, V. 31, pp. 273–284.

15. Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: <http://www.algaebase.org> (accessed: 8.04.2022).

16. Korsakova O., Kolka V., Tolstobrov D., Savelieva L., Kosova A., Petrov A., Semyonova L. Holocene environments on the west-central Kola Peninsula (north-west Russia): lithology, chronology and biostratigraphy records from Lake Tikozero and a neighbouring bog. J. Quaternary Sci., 2022, pp. 1–13.

17. Nikolaeva S., Tolstobrov D., Tolstobrova A. Disturbances in the primary stratigraphy of lake sediments on the Murmansk coast (Russia): their identification and relationship with catastrophic events. Baltica, 2019, V. 32, No. 2, pp. 156–169.

18. Snyder J. A., Forman S. L., Mode W. N., Tarasov G. A. Postglacial relative sea-level history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, northcentral Kola Peninsula, Russia. Boreas, V. 26, 1997, pp. 329–346.

19. Snyder J. A., MacDonald G. M., Forman S. L., Tarasov G. A., Mode W. N. Postglacial climate and vegetation history, north-central Kola Peninsula, Russia: pollen and diatom records from Lake Yarnyshnoe-3. Boreas, 2000, V. 29, pp. 261–271.

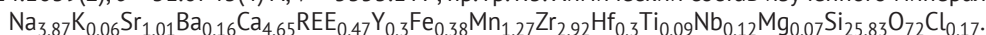
Received / Поступила в редакцию 18.04.2022

Кристаллохимические особенности обогащенного стронцием аквалитоподобного минерала из Кондерского массива

Р. К. Расцветова

Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва,
rast@crys.ras.ru

Методами электронно-зондового микроанализа и рентгеноструктурного анализа исследован обогащенный стронцием минерал группы эвдиалита из Кондерского щелочного массива (Южная Якутия). Изученный образец найден А. П. Хомяковым. Его кристаллическая структура уточнена до итогового фактора расходимости $R = 3.9\%$ в анизотропном приближении атомных смещений с использованием 2188 независимых рефлексов с $F > 3\sigma(F)$. Параметры элементарной тригональной ячейки: $a = 14.1039(2)$, $c = 31.0743(4)$ Å, $V = 5353.1$ Å³, пр. гр. $R\bar{3}$. Химический состав изученного минерала ($Z = 3$):



Обсуждаются кристаллохимические особенности минерала и его место среди гидратированных аквалитоподобных эвдиалитов.

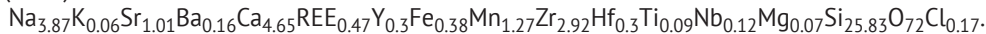
Ключевые слова: аквалит, группа эвдиалита, кристаллическая структура, изоморфизм, Кондерский щелочной массив.

Crystal chemistry features of the Sr-rich aqualite-like mineral from the Konder alkaline complex

R. K. Rastsvetaeva

Shubnikov Institute of Crystallography FSRC «Crystallography and Photonics» RAS, Moscow

A hydrated Sr-rich member of the eudialyte-group mineral from Konder (Southern Yakutia) alkaline complex has been investigated by the methods of electron probe microanalysis and X-ray diffraction. The crystal structure was refined to $R = 3.9\%$ in the anisotropic approximation of atomic displacements using 2188 independent reflections with $F > 3\sigma(F)$. The unit-cell parameters are: $a = 14.1039(2)$, $c = 31.0743(4)$ Å, $V = 5353.1$ Å³; the space group $R\bar{3}$. The chemical composition of the studied mineral ($Z = 3$):



The crystal chemistry features of the mineral and its place among hydrated eudialytes are discussed.

Keywords: aqualite, eudialyte group, crystal structure, isomorphism, Konder alkaline complex.

Введение

Аквалит $(\text{H}_3\text{O})_8(\text{Na}, \text{K}, \text{Sr})_5\text{Ca}_6\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{66}(\text{OH})_9\text{Cl}$ — гидратированный минерал, открытый А. П. Хомяковым в пегматитах Инаглинского щелочного массива (Республика Саха (Якутия)) [8], характеризуется низким содержанием щелочных элементов при высоком содержании H_2O . В природе так называемые Н-эвдиалиты относительно редки и образуются в результате ионного обмена Na^+ на ион оксония H_3O^+ . Высокое содержание H_3O^+ установлено также в илюхините $(\text{H}_3\text{O}, \text{Na})_{14}\text{Ca}_6\text{Mn}_2\text{Zr}_3\text{Si}_{26}\text{O}_{72}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [12] и при общем доминировании натрия в позициях внекаркасных катионов — в икраните $(\text{Na}, \text{H}_3\text{O})_{15}(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{REE})_6\text{Fe}^{3+}_2\text{Zr}_3(\square, \text{Zr})(\square, \text{Si})\text{Si}_{24}\text{O}_{66}(\text{O}, \text{OH})_6\text{Cl} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ [4, 12]. Известны также аквалитоподобные минералы из Хибинского, Прихубсугульского и Кондерского массивов [14]. Эти Н-эвдиалиты разного химического состава и происхождения отличаются от типичных эвдиалитов низким содержанием катионов Na и высокой гидратированностью (до 10 мас. % H_2O) и характеризуются разной степенью замещения Na на H_3O . Кроме

Na в них содержится ряд других крупных элементов; ряд минералов обогащен калием, стронцием, барием или редкими землями (табл. 1). Голотипный аквалит содержит повышенное количество K. Недавно был найден в Ковдорском массиве калиево-доминантный образец аквалита [7]. Наиболее высокие содержания Ba обнаруживаются в составе Н-эвдиалитов из карбонатитов Ковдорского, Кондерского и Инаглинского массивов [8, 14], что может быть связано с геохимическими особенностями среды их преобразования на гидротермальной стадии [2].

Разные компоненты, находящиеся в цеолитоподобных полостях, имеют возможность «подбирать» себе энергетически выгодные позиции для компенсации зарядов при гетеровалентных замещениях. При этом они статистически занимают позиции с неполной заселенностью, находящиеся на коротких расстояниях друг от друга, и при определенных условиях могут упорядочиваться по этим позициям. Калиево-доминантный образец характеризуется максимальной упорядоченностью крупных катионов в полостях каркаса [7].

Для цитирования: Расцветова Р. К. Кристаллохимические особенности обогащенного стронцием аквалитоподобного минерала из Кондерского массива // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 38–43. DOI: 10.19110/geov.2022.6.4.

For citation: Rastsvetaeva R. K. Crystal chemistry features of the Sr-rich aqualite-like mineral from the Konder alkaline complex. Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 38–43, doi: 10.19110/geov.2022.6.4.



Таблица 1. Содержание крупных катионов ($Z = 3$) в аквалитоподобных минералах группы эвдиалита из разных массивов

Table 1. Large cation composition ($Z = 3$) in aqualite-like minerals of eudialyte group from different massifs

Минерал (массив) / Mineral (massif)	Элементы / Elements				
	Na	K	Ba	Sr	Ce
Образец 1 (Инагли) / Sample 1 (Inagli)	7.4	0.53	0.38	0.63	0.16
Образец 3 (Хибинь) / Sample 3 (Khibiny)	4.4	0.21	0.04	0.48	0.2
Образец 4 (Хибинь) / Sample 4 (Khibiny)	3.66	0.2	0.03	0.63	0.22
Образец 5 (Хубсугуль) / Sample 5 (Khubsugul)	4.3	0.3	—	0.05	0.63
Образец 6 (Кондер) / Sample 6 (Konder)	3.87	0.06	0.16	1.07	0.47
Аквалит (Инагли) / Aqualite (Inagli)	2.74	1.2	0.46	0.49	0.19
К-аналог аквалита (Ковдор) / K-analogue of aqualite (Kondor)	3.7–5.3	1.4–1.8	0.5	0.4	0.4

Примечание: образцы 1–6 [14], аквалит [8], К — аналог аквалита [7].

Note: Образец 1–6 [14], aqualite [8], K — analogue of aqualite [7].

Чаще всего Sr, изоморфно замещающий Na, является обычной примесью в минералах группы эвдиалита (МГЭ) из аптаитовых пегматитов, и его содержание не превышает 1 атома на формулу. В ранее опубликованной статье [5] мы обсуждали видообразующую роль Sr в ряде высокостронциевых эвдиалитов из Ловозерского, Хибинского массивов, а также из массивов Одихинча и Сент-Илер. Эти минералы содержат 2–3 атома Sr на формулу. Все они высокониобиевые и содержат Sr в N3- или N4-позициях, а также Cl, молекулы воды или CO₃-группы в одной из внекаркасных X-позиций на оси 3-го порядка. Особенностью состава этих минералов является отсутствие оксониевых групп, которые могут замещать крупные катионы, главным образом в двух из пяти N-позиций (N3 и N4).

В настоящей работе изучен образец из Кондера, который характеризуется повышенным содержанием Sr (SrO = 2.7–3.8 мас. %) при одновременном содержании BaO = 0.67–0.81 мас. %, что необычно для эвдиалитов, отсутствием хлора, фтора и CO₃-групп. Его отличает также высокая степень замещения крупных катионов на H₂O-группы.

Объект, методы и результаты исследования

Изученный в настоящей работе минерал был обнаружен А. П. Хомяковым на Восточном Алдане Кондерского щелочного массива (образец 3398).

Химический состав образца определен на волновом дисперсионном микроанализаторе Jeol 733 и характеризуется низким содержанием катионов Na и высокой гидратированностью (до 10 мас. % H₂O). Состав, пересчитанный на сумму высокозарядных катионов Si + Ti + Zr + Nb + Hf = 29-х, где х — содержание вакансий, приводит к следующей эмпирической формуле ($Z=3$): Na_{3.87}K_{0.06}Ca_{4.65}Sr_{1.07}Ba_{0.16}Mg_{0.07}Mn_{1.27}Fe_{0.38}(La_{0.08}Ce_{0.22}Nd_{0.09}Gd_{0.03}Er_{0.05})Y_{0.32}Zr_{2.92}Ti_{0.09}Hf_{0.03}Si_{25.83}Nb_{0.12}Cl_{0.17}(H₂O)_x(H₂O)_y(OH)_zO₇₂. Содержание воды определено как разность между 100 % и общей суммой кризондового анализа и составляет 9.99 %. Вычисленная плотность минерала — 2.675 г/см³.

Дифракционный эксперимент от монокристалла размером ~ 0.2 × 0.2 × 0.3 мм³ получен в университете г. Дурхам (Великобритания) на дифрактометре SMART

1000 CCD (MoKα; λ = 0.71073 Å) при пониженной (103K) и комнатной температурах. Поглощение учтено эмпирически при обработке эксперимента по программе SADABS. В полученном экспериментальном наборе в пределах до sin θ/λ < 0.71 содержалось 6169 рефлексов $F > 3\sigma(F)$ (область съемки: -20 < h < 20; -20 < k < 17; -40 < l < 44). Число независимых отражений составляло 2188 $F > 3\sigma(F)$ при R-факторе усреднения эквивалентных отражений 0.016.

Минерал тригональный, с параметрами элементарной ячейки при T = 103K: a = 14.1039(2), c = 31.0743(4) Å, V = 5353.1(2) Å³; при комнатной температуре: a = 14.118(2), c = 31.13(1) Å, V = 5373.3 Å³, пр. гр. R3̄.

Для уточнения структуры в качестве стартовых использованы координаты атомов Zr, Si и Ca каркаса, а также входящих в их окружение атомов O, (Na, Fe)-декаатионированного эвдиалита [3]. Позиции внекаркасных атомов на оси 3-го порядка M3, M4, X1, X2 и в полостях N1 — N8 найдены из серии разностных синтезов электронной плотности. Уточнение состава ряда позиций проводилось с учетом смешанных кривых атомного рассеяния и частичной заселенности. Кристаллическая структура уточнена до финального фактора расходимости R = 3.9 % по 2188 отражениям $F > 3\sigma(F)$ в анизотропном приближении атомных смещений. Все расчеты выполнены с использованием системы кристаллографических программ AREN [1]. Координаты внекаркасных атомов, параметры их атомных смещений, заселенности и состав позиций приведены в табл. 2. Структурные данные для атомов Si каркаса и входящих в их координацию атомов кислорода опущены, т. к. они близки к соответствующим значениям в (Na, Fe)-декаатионированном эвдиалите и в данной статье не обсуждаются.

Установленные кристаллохимические особенности минерала отражены в его кристаллохимической формуле ($Z = 3$): [(H₂O)_{8.53}Na_{3.51}Sr_{0.55}Ce_{0.45}Y_{0.3}Ba_{0.15}K_{0.06}]_{Σ13.55} [Ca_{2.25}Sr_{0.45}Na_{0.3}] [Ca_{2.4}Mn_{0.6}] [Zr_{2.97}Hf_{0.03}] [Mn_{0.64}Fe_{0.38}][(Si_{0.9})(Nb_{0.1})] [(Si_{0.49})(Ti_{0.19})] [Si₃O₉]₂[Si₉O_{25.5}(O, OH)_{1.5}]₂(OH)_{2.3}·2.8H₂O.

Обсуждение результатов

Минерал в целом изоструктурен, с высокооксониевыми МГЭ [14]. Однако в ряде ключевых позиций есть особенности состава и строения, присущие изу-

Таблица 2. Координаты, параметры эквивалентных/изотропных атомных смещений ($B_{экв/изо}$, Å), состав, заселенность (q) и кратность (Q) позиций во внекаркасной части структуры обогащенного стронцием аквалитоподобного эвдиалита из Кондерского массива

Table 2. Atom coordinates, equivalent/isotropic atomic displacement parameters ($B_{eq/iso}$, Å), composition, site occupancy factors (q) and site multiplicities (Q) in the extraframework part of the crystal structure of Sr-rich aqualite-like mineral from the Konder complex

Позиция Site	Координаты атомов / Atom coordinates			Q	q	$B_{экв/изо}^*$ $B_{eq/iso}^*$	Состав ($Z^{**} = 3$) Composition ($Z^{**} = 3$)
	x	y	z				
Z	0.3329(1)	0.1667(1)	0.1669(1)	9	1	1.91(2)	2.97Zr + 0.03Hf
M1.1	0.2654(1)	0.0015(1)	0.0003(1)	9	1	1.54(3)	2.25Ca + 0.45Sr + 0.3Na
M1.2	0.2656(1)	0.2641(1)	0.0003(1)	9	1	1.30(3)	2.4Ca + 0.6Mn
N1	0.1106(3)	0.2202(3)	0.1515(1)	9	1	3.70(5)	2.79Na + 0.15Ba + 0.06K
N2a	0.5605(2)	0.4386(2)	0.1796(1)	9	0.80(2)	2.98(6)	1.13H ₃ O + 0.72Na + 0.55Sr
N2b	0.603(3)	0.204(4)	0.160(1)	9	0.20(2)	3.7(4)	0.6H ₃ O
N3	0.2452(5)	0.4894(8)	-0.0477(2)	9	1	3.06(6)*	2.7H ₃ O + 0.3Y
N4a	0.4697(2)	0.2352(2)	0.0493(1)	9	0.15(1)	2.15(5)	0.45Ce
N4b	0.544(2)	0.270(3)	0.060(1)	9	0.44(2)	6.5(2)	1.32 H ₃ O
N4c	0.528(2)	0.265(2)	0.0296(6)	9	0.41(2)	4.4(3)	1.23H ₃ O
N5	0.282(9)	0.579(7)	0.179(2)	9	0.20(2)	6.0(5)*	0.60 H ₃ O
N6	0.590(8)	0.184(8)	0.003(3)	9	0.19(2)	5.7(3)	0.38OH
N7	0.406(1)	0.593(1)	0.0033(4)	9	1	3.51(9)*	1.6H ₃ O + 1.4OH
N8	0	0	-0.016(8)	3	0.20(4)	4.9(9)*	0.2H ₃ O
M2	0.0231(3)	0.5110(5)	0.0021(2)	9	0.34(2)	2.01(5)	0.65Mn + 0.38Fe
M3a	0.3333	0.6667	0.2411(5)	3	0.29(2)	2.10(3)	0.29Si
M3b	0.3333	0.6667	0.2770(4)	3	0.20(1)	1.41(3)	0.20Si
M3c	0.3333	0.6667	0.3030(3)	3	0.19(1)	0.6(3)	0.1Ti + 0.07Mg + 0.02Nb
M4a	0.3333	0.6667	0.0366(4)	3	0.10(2)	2.0(2)	0.1Nb
M4b	0.3333	0.6667	0.0658(3)	3	0.41(3)	1.3(1)	0.43Si
M4c	0.3333	0.6667	0.0935(3)	3	0.49(3)	2.2(2)	0.49Si
OH1	0.3333	0.6667	0.012(2)	3	0.41(4)	7.1(4)	0.43OH
OH2	0.3333	0.6667	0.142(1)	3	0.49(5)	4.5(4)	0.49OH
OH3	0.3333	0.6667	0.191(4)	3	0.29(4)	2.9(7)	0.29OH
OH4	0.3333	0.6667	0.328 (2)	3	0.20(6)	4.6(9)	0.20OH
X1a	0	0	0.1879(3)	3	0.68(4)	5.3(3)	0.68H ₂ O
X1b	0	0	0.2026(3)	3	0.31(3)	4.1(7)	0.31H ₂ O
X1c	0	0	0.298(3)	3	0.33(3)	5.8(5)	0.33H ₂ O
X2a	0.6667	0.3333	0.147(3)	3	0.57(7)	4.0(7)	0.57H ₂ O
X2b	0.6667	0.3333	0.072(1)	3	0.23(5)	1.4(8)	0.23H ₂ O

Примечание: **число формульных единиц.

Note: **number of formula units.

ченному в настоящей работе образцу. При пониженном содержании Ca (< 6 атомов на формулу, $Z = 3$) обычно происходит упорядочение атомов Ca и других элементов, дополняющих его количество до 6 атомов. При этом единая позиция Ca распадается на 2 независимые позиции в M1-октаэдрах 6-членного кольца с понижением симметрии от $R3m$ до $R3$ [4, 10, 12, 13]. В данной структуре Ca доминирует в обоих близких по размерам и составу M1-октаэдрах, а среди дополняющих элементов наряду с Mn и Na присутствует и Sr. Расстояния в M1.1- и M1.2-октаэдрах равны соответственно 2.269(9) – 2.385(8) Å (среднее значение 2.33 Å) и 2.245(8) – 2.43(1) Å (среднее значение 2.34 Å), а понижение симметрии вызвано в основном другими причинами, которые будут рассмотрены ниже.

Ключевая M2-позиция находится вблизи центра квадрата, образованного параллельными ребрами M1O₆-октаэдров соседних шестичленных колец и дополненного OH-группой до 5-вершинника с расстоя-

ниями «катион – анион» в пределах 2.005(4) – 2.347(9) (среднее 2.25 Å). Она занята атомами Mn и Fe и существенно вакансионна.

Ключевые позиции M3 и M4 находятся на оси третьего порядка вблизи центров девятичленных колец [Si₉O₂₇] по обе стороны от их плоскостей. Каждая из них расщепляется на три подпозиции с короткими расстояниями друг до друга: M3a – M3b = 1.11, M3b – M3c = 0.80(1), M4a – M4b = 0.90(1), M4b – M4c = 0.86 Å соответственно. Эти подпозиции статистически заняты почти полностью атомами Si, с небольшой добавкой атомов Nb, Mg и Ti в октаэдрической координации с расстояниями «катион–анион» в M3- и M4-октаэдрах 2.00–2.09 и 1.93–2.06 Å соответственно.

Позиции крупных катионов находятся в полостях N(1–8) (рис. 1, 2). Кондерский образец характеризуется слабой упорядоченностью состава по позициям, которые либо не расщепляются (N1, N3, N5), либо содержат смешанный состав катионов в некоторых расщепленных позициях (N2a).



Атомы Na с примесью атомов Ba и K целиком заполняют 9-вершинник в полости N1 с расстояниями «катион — анион» в пределах 2.48–2.92 (среднее $\langle N1 - O \rangle = 2.66 \text{ \AA}$). Атомы Na и Sr наряду с доминирующими H_2O -группами располагаются в одной из двух расщепленных N2-подпозиций (N2a — N2b = 1.17(4) Å). Причем Sr-содержащий полиэдр — 8-вершинник с расстояниями в пределах 2.42–2.86 (среднее $\langle N2 - O \rangle = 2.64 \text{ \AA}$), в то время как вторая подпозиция (N2b) заселена H_2O -группой, образующей 6-вершинник со средним расстоянием 2.68 Å. Полости N3 и N4 заняты оксидом с примесью небольшого количества редкоземельных элементов в 7-вершиннике с расстояниями N4a — O = 2.45(1) — 3.102(7) Å. Позиция N5 заполнена H_2O -группами, а также OH-группами в вершинах дополнительных Si-тетраэдров (подпозиции M3a и M4c). Заселенность позиций N6 и N7 оксониевыми группировками и OH-группами, входящими в координацию Nb- и Ti-октаэдров, коррелирует с занятостью позиции M2, которая в данном минерале существенно ваканционна.

В наименьшей степени заселена позиция № 8. Она находится в центре замкнутой полости в середине шестерного кольца, прикрытой сверху и снизу тройными кольцами $[Si_3O_9]$ (рис. 2). Эта компактная полость может быть заселена крупными катионами K и молекулами H_2O , но в большинстве ранее изученных минералов остается вакантной [4]. В гидратированных образцах № 3 из Хибинского массива [14] и K-доминантного аналога аквалита из Ковдорского массива в позиции с координатами [0 0 0] в этой полости содержится 0.22 и 0.28 H_3O^+ соответственно. В данном образце она также частично занята H_2O -молекулами в 12-вершиннике с расстояниями в пределах 2.5(1)–3.3(2) Å.

Гидратация, не связанная с выщелачиванием катионов Na, происходит в позициях дополнительных анионов X1 и X2 на оси 3-го порядка. В изученном нами образце расположенные в этих позициях ионы Cl замещены на молекулы воды полностью, в отличие от высокостронциевых минералов, например голотипного тасекита из Илимаусака с двумя хлордоминантными X-позициями [11].

Заключение

Образец из Кондерского массива характеризуется сравнительно более низким содержанием Na и высокой степенью гидратированности среди H-эвдиалитов, в которых замещение крупных катионов происходит главным образом на ионы H_3O . Присутствие H_2O в аквалите и H-эвдиалитах подтверждается и рамановскими спектрами, которые оказались значительно более чувствительными, чем ИК-спектры, к присутствию гидратированных форм протона вследствие аномально высокой поляризуемости связей O–H в этих комплексах [9, 6]. В данном образце H_2O доминирует среди внутрикаркасных катионов, заполняя все крупнокатионные позиции, кроме N1.

Изученный образец эвдиалита из Кондерского массива содержит существенное количество атомов Sr (больше одного атома на формульную единицу). Однако распределение этих атомов по двум позициям — в одном из M1-октаэдров 6-членного кольца и в одном из

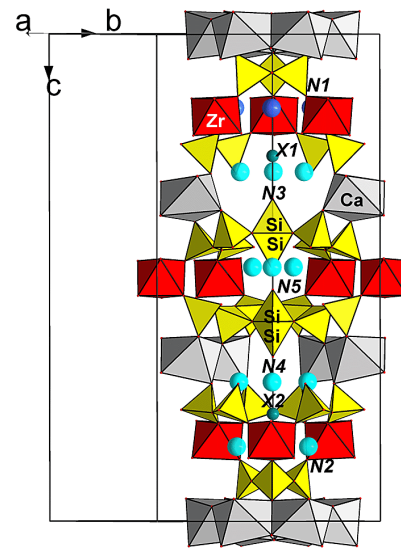


Рис. 1. Общий вид структуры кондерского аквалитоподобного минерала

Fig. 1. A general view of the konder aqualite-like mineral structure

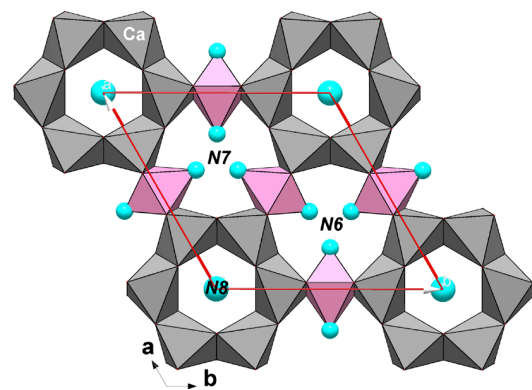


Рис. 2. Структура кондерского аквалитоподобного минерала в проекции на плоскость (001)

Fig. 2. Konder aqualite-like mineral structure in projection on plane (001)

N-полиэдров — приводит к тому, что этот образец не отличается от большинства других, где Sr является примесью в одной из этих позиций или в обеих одновременно. Особенность данного образца в том, что Sr входит в позицию N2, а не в N3 или N4, что не характерно для других эвдиалитов.

Еще одним отличием данного образца является разделение единой позиции в Ca-центрированном M1-октаэдре без существенного дефицита Ca. Этот факт наличия группы R3 у образца со слабой различимостью средних расстояний в M1.1- и M1.2-октаэдрах может свидетельствовать о времени изменения минерала — после окончания кристаллизации или в процессе кристаллизации. Поскольку во всех изученных недекатионированных эвдиалитах с группой R3 эти расстояния существенно различны [4], можно предположить, что разный состав M1-полиэдров формировался уже в процессе кристаллизации этих эвдиалитов. В частности, данный образец мог первоначально

кристаллизоваться в группе $R3m$ и, возможно, длительное время существовать в этой модификации со статистическим распределением Sr, Na и Mn в Са-октаэдрах, а в дальнейшем (при наложении вторичных процессов) понизить свою симметрию не столько за счет перераспределения этих элементов между M1.1- и M1.2-позициями, сколько за счет специфического поведения H_2O — его подвижности со смещением позиций атомов кислорода оксониевых групп с вертикальной плоскости m .

Концентрация Ва в данном образце из Кондерского массива может быть связана с максимумом активности этого элемента на гидротермальной стадии преобразования минерала в этом массиве [2].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Литература

1. Андрианов В. И. AREN-85 — система кристаллографических программ РЕНТГЕН на ЭВМ NORD, SM-4 и EC // Кристаллография. 1987. Т. 32. № 1. С. 228—232.

2. Моисеев М. М., Чуканов Н. В. Минералогия щелочных пегматитов и гидротермалитов Ковдорского массива // Новые данные о минералах. 2006. Т. 41. С. 56—70.

3. Расцветаева Р. К., Хомяков А. П. Особенности структуры Na, Fe-декационированного эвдиалита с симметрией $R3$ // Кристаллография. 2002. Т. 47. № 2. С. 267—271.

4. Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В., Аксенов С. М. Минералы группы эвдиалита: кристаллохимия, свойства, генезис. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2012. 230 с.

5. Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В., Лисицин Д. В., Воронин М. В., Варламов Д. А. Кристаллическая структура и индикаторное значение одихинчаита из Хибинского массива // Вестник геонаук. 2021. № 4. С. 3—9. DOI: 10.19110/geov.2021.4.1.

6. Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В. Еще раз о проблеме оксония в эвдиалитах // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2022). Сыктывкар, 18—20 мая 2022. С. 68—69.

7. Расцветаева Р. К., Чуканов Н. В., Пекон Н. В., Вигасина М. Ф. Кристаллохимические особенности катионоупорядоченного калиевого аналога аквалита из Ковдорского массива (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2022 (в печати).

8. Хомяков А. П., Нечелюстов Г. Н., Расцветаева Р. К. Аквалит $(H_2O)_8(Na,K,Sr)_5Ca_6Zr_3Si_{26}O_{66}(OH)_9Cl$ — новый минерал группы эвдиалита из щелочного массива Инагли, Саха-Якутия, Россия, и проблема оксония в гидратированных эвдиалитах // ЗРМО. 2007. Т. 136. № 2. С. 39—55.

9. Chukanov N. V., Vigasina M. F., Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Mikhailova J. A., Pekov I. V. The evidence of hydrated proton in eudialyte-group minerals based on Raman spectroscopy data // J. Raman Spectrosc. 2022. P. 1—16. DOI: 10.1002/jrs.6343.

10. Johnsen, O., Ferraris G., Gault R. A., Grice J. D., Kampf A. R., Pekov I. V. The nomenclature of eudialyte-group minerals // Canad. Mineral. 2003. V. 41. P. 785—794.

11. Petersen O. V., Johnsen O., Gault R. A., Niedermayr G., Grice J. D. Taseqite, a new member of the eudialyte group from the Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland // Neues Jahrb. Mineral. Monatsh. 2004. P. 83—96.

12. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Pekov I. V., Schäfer Ch., Van K. V. New data on the isomorphism in eudialyte-group minerals. 1. Crystal chemistry of eudialyte-group members with Na incorporated into the framework as a marker of hyperagpaitic conditions // Minerals. 2020. Vol. 10. Paper No. 587. DOI: 10.3390/min10070587.

13. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V. New data on the isomorphism in eudialyte-group minerals. 2. Crystal-chemical mechanisms of blocky isomorphism at the key sites (a review) // Minerals 2020, Vol. 10, P. 720. DOI: 10.3390/min10080720.

14. Rozenberg K. A., Rastsvetaeva R. K., Khomyakov A. P. Decationized and hydrated eudialytes. Oxonium problem // Eur. J. Miner. 2005. V. 17. P. 875—882.

References

1. Andrianov V. I. AREN-85 — sistema kristallograficheskikh programm RENTGEN na EVM NORD, SM-4 i EC (AREN-85 — a system of crystallographical programs RENTGEN for EVM NORD, SM-4 and EC). Kristallografiya, 1987, V. 32, No. 1, pp. 228—232.

2. Moiseev M. M., Chukanov N. V. Mineralogiya shchelochnykh pegmatitov i gidrotermalitov Kovdorskogo massiva (Mineralogy of alkaline pegmatites and hydrothermalites of the Kovdor massif). New Data on Minerals, 2006, V. 41, pp. 56—70.

3. Rastsvetaeva R. K., Khomyakov A. P. Osobennosti struktury Na, Fe-dekationirovannogo evdialita s simmetriyey $R3$ (Structural characteristics of Na, Fe-decationized eudialyte with the symmetry $R3$). Crystallogr. Rep., 2002, V. 47, No. 2, pp. 232—236.

4. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Aksenov S. M. Mineraly gruppy evdialita: kristallokhiimiya, svoystva, genezis (Eudialyte-Group Minerals: Crystal Chemistry, Properties, and Genesis). Editorial House of the Nizhny Novgorod State Univ., Nizhny Novgorod, 2012, 230 pp.

5. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Lisitsin D. V., Voronin M. V., Varlamov D. A. Kristallicheskaya struktura i indikatornoye znachenie odikhinchaita iz Khibinskogo massiva (Crystal structure and indicator significance of odikhinchaita from the Khibiny alkaline complex). Vestnik of geosciences, 2021, No. 4, pp. 3—9.

6. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V. Yeshche raz o probleme oksoniya v evdialitakh. Sovremennyye problemy teoreticheskoy, eksperimental'noy i prikladnoy mineralogii (Yushkinskiye chteniya — 2022) (One more about oxonium problem in eudialytes). Proceedings of conference “Modern problems of the theoretical, experimental and applied mineralogy” (Yushkin Readings — 2022). Syktyvkar, pp. 68—69.

7. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Pekov N. V., Vigasina M. F. Kristallokhimicheskiye osobennosti kationo-uporyadochenogo kaliyevogo analoga akvalita iz Kovdorskogo massiva (Kolskiy poluostrov) (Crystal chemical features of cation-ordered potassium analogue of aqualite from the Kovdor massif (Kola peninsula)) Proceedings of RMS, 2022 (in press).

8. Khomyakov A. P., Nечелюстов Г. Н., Rastsvetaeva R. K. Akvalit $(N_3O)_8(Na,K,Sr)_5Ca_6Zr_3Si_{26}O_{66}(OH)_9Cl$ — novyy mineral gruppy evdialita iz shchelochnogo massiva Inagly, Sakha-Yakutiya, Rossiya, i problema oksoniya v gidratirovannykh evdialitakh (Aqualite $(H_2O)_8(Na, K, Sr)_5Ca_6Zr_3Si_{26}O_{66}(OH)_9Cl$, a new mineral of eudialyte-group from the alkaline Inagly massif, Saha-Yakutiya, Russia, and oxonium problem in hydrated eudialytes). Proceedings of RMS, 2007, V. 136, No. 2, pp. 39—55



9. Chukanov N. V., Vlgasina M. F., Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Mikhailova J. A., Pekov I. V. The evidence of hydrated proton in eudialyte-group minerals based on Raman spectroscopy data. *J. Raman Spectrosc*, 2022, pp. 1–16. DOI: 10.1002/jrs.6343.

10. Johnsen, O., Ferraris G., Gault R.A., Grice J. D., Kampf A.R., Pekov I.V. The nomenclature of eudialyte-group minerals. *Canad. Mineral.*, 2003, V. 41, pp. 785–794.

11. Petersen O. V., Johnsen O., Gault R. A., Niedermayr G., Grice J. D. Taseqite, a new member of the eudialyte group from the Ilimaussaq alkaline complex, South Greenland. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.*, 2004, pp. 83–96.

12. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V., Pekov I. V., Schäfer Ch., Van K. V. New data on the isomorphism in eudialyte-group

minerals. 1. Crystal chemistry of eudialyte-group members with Na incorporated into the framework as a marker of hyperaluminous conditions. *Minerals*, 2020, V. 10, Paper No. 587. DOI: 10.3390/min10070587.

13. Rastsvetaeva R. K., Chukanov N. V. New data on the isomorphism in eudialyte-group minerals. 2. Crystal-chemical mechanisms of blocky isomorphism at the key sites (a review). *Minerals*, 2020, V. 10, pp. 720. DOI: 10.3390/min10080720.

14. Rozenberg K. A., Rastsvetaeva R. K., Khomyakov A. P. Decationized and hydrated eudialytes. Oxonium problem. *Eur. J. Miner.*, 2005, V. 17, pp. 875–882.

Received / Поступила в редакцию 27.05.2022



Из опыта преподавания. XI. История и философия в курсах кристаллографии и минералогии

Ю. Л. Войтеховский

Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты;
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург; *Voytekhovskiy_YuL@pers.spmi.ru*

Статья посвящена истории и философии кристаллографии и минералогии. Составленная из отдельных сюжетов, в целом она показывает широкий диапазон тем, которые целесообразно обсудить со студентами-геологами по мере прохождения курсов «Кристаллография» и «Минералогия». Это можно сделать в ходе лекций во время пауз, рекомендуемых действующими педагогическими методиками, или факультативно. Приведен обширный список первоисточников и свежей литературы для подготовки бесед. Их цель видится в том, чтобы привлечь студентов к чтению серьезной литературы по истории и философии изучаемых наук.

Ключевые слова: кристаллография, минералогия, история и философия науки.

From teaching experience. XI. History and philosophy at the crystallography and mineralogy courses

Yu. L. Voytekhovskiy

Geological Institute of FRC KSC RAS, Apatity;
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg

The article is devoted to the history and philosophy of crystallography and mineralogy. Composed from individual plots, in general, it shows a wide range of topics advisable to discuss with geological students at the Crystallography and Mineralogy courses. This can be done in the framework of the lectures during pauses recommended by the current pedagogical methods, or optionally. An extensive list of primary sources and fresh literature is given to prepare conversations. Their goal is attracting students to read a serious literature on the history and philosophy of the studied sciences.

Keywords: crystallography, mineralogy, history and philosophy of science.

Введение

Методологи университетского образования требуют, чтобы лектор делал паузы. Помнится, их делали и наши профессора, но без указки, по мере необходимости. Чем же заполнить паузы, чтобы и это время использовать оптимально? Исходя из своего многолетнего опыта, рекомендуем делать экскурсии в историю и философию науки, в нашем случае — кристаллографии и минералогии. В части истории у нас есть богатейший источник сведений, хотя бы в книгах и статьях И. И. Шафрановского. С философией дело обстоит хуже. Но к ней обращаться важно, ибо она стремительно уходит из естественных наук, оставляя по себе лишь английское наименование ученой степени Ph. D., т. е. Philosophy Degree. А диссертации при этом становятся все более приборными, аппаратными, аналитическими. Да, каждый новый анализ добавляет толику знания о минерале или горной породе. Но добавляет ли он понимания, т. е. предельного, далее не интерпретируемого знания о природе? А ведь философия апеллирует именно к пониманию... Пожалуй, ныне лишь Юшкинские чтения (Институт геологии им. Н. П. Юшкина, Сыктывкар) раз в два года предусматривают в программе секцию истории и философии кристаллографии и минералогии. Да еще философский семинар при НПО

«Радиевый институт им. А. Г. Хлопина» (Санкт-Петербург) ежемесячно сводит вместе философов и представителей естественных наук. (Заметим, что институт основан В. И. Вернадским, короткое время его директором был А. Е. Ферсман.) Статья моделирует лекционные паузы в цикле «Из опыта преподавания».

История

Студенты с интересом слушают исторические анекдоты, т. е. забавные истории с участием выдающихся личностей. Ниже сформулированы темы, которые легко развить в более или менее продолжительные беседы.

1. До Н. Стено (1638—1686) полагали, что кристаллы растут подобно растениям, питаются соками земли через корни. Он первый догадался об отложении вещества на гранях кристаллов, правильно интерпретировал их зональность и сформулировал первый эмпирический закон кристаллографии «о постоянстве углов между соответственными гранями кристаллов» [43]. Между тем мы и сегодня говорим о диффузии атомов и вакансий через кристаллическую решетку: прямом обмене атомов, кольцевом обмене, перемещении по междоузлиям, эстафетной диффузии (краудион), пе-

Для цитирования: Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. XI. История и философия в курсах кристаллографии и минералогии // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 44–52. DOI: 10.19110/geov.2022.6.5.

For citation: Voytekhovskiy Yu. L. From teaching experience. XI. History and philosophy at the crystallography and mineralogy courses. Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 44–52, doi: 10.19110/geov.2022.6.5.



ремещении по вакансиям, диссоциативном перемещении, миграции по протяженным дефектам (дислокациям, дефектам упаковки, границам зерен)... Так старые представления отчасти уходят, отчасти трансформируются и обретают новую жизнь.

2. Второй эмпирический закон «рационального отношения параметров» открыт иностранным почетным членом Петербургской академии наук (1806) и Российского минералогического общества (1820) Р. Ж. Гаюи (1743—1822) в 1784 г. без отрыва от исканий в смежных областях знания [47]. Дж. Дальтон (1766—1844) вскоре сформулировал закон кратных отношений для химических соединений (1803). Полезно сравнить обе формулировки и показать, что они легли в основание современных представлений об атомном строении вещества. Между тем в любую эпоху во всяком архитектурном стиле узнаваем тот или иной закон пропорциональности [18]. Кратность целого и частей на фоне диалектики дискретного и непрерывного таится глубоко в замыслах природы и структурах нашего сознания. Последний теоретический прорыв в понимании этого — «Фрактальная геометрия природы» [32]. Тема плавно переливается в философскую.

3. Всему миру известно, как Р. Ж. Гаюи разбил замечательный кристалл исландского шпата в форме тригонального скаленоэдра [3, 50]. Собирая осколки, он увидел, что все они — спайные выколки в форме искаженных ромбоэдров, т. е. косоугольных параллелепипедов. Эврика! Кристаллы состоят из одинаковых кирпичиков, грань к грани, у каждого минерала свой кирпичик. Потом начались трудности и попытки Р. Ж. Гаюи спасти гипотезу. Не видно шероховатости на гранях скаленоэдра, потому что ромбоэдрические кирпичики слишком малы. Но как быть со спайными октаэдрами, которые в принципе не могут заполнить пространство флюорита? Р. Ж. Гаюи не смог ответить на этот вопрос. Между тем октаэдрами и тетраэдрами заполнить пространство можно. Догадайся он об этом, мог бы предвосхитить теорию плотнейших упаковок У. Барлоу. Не случилось... Борьба классика за свою гипотезу интересна даже с психологической точки зрения. А сюжет о кирпичиках исчерпал Е. С. Федоров в теории параллелоэдров. Вывод: всякую идею следует доводить до конца. С другой стороны, как его узнать?

4. О. Браве (1811—1863) сломал ногу во время экспедиции на Шпицберген в 1839 г. и был вынужден все лето ждать товарищей на берегу в Хаммерфесте. Его «Мемуар о системах точек, правильно распределенных на плоскости или в пространстве», в котором он вывел 14 решеток, решительно заменив полиэдрические молекулы Р. Ж. Гаюи их центрами тяжести и направив развитие кристаллографии по новому пути, вышел в 1850 г., а «Кристаллографические этюды» — вообще в 1866 г. [14, 50]. Но по ряду признаков можно заключить, что, уже хромя в гипсе по берегу Норвежского моря, он усиленно работал над проблемой. Совет студентам: в дальних походах иметь блокнот со списком фундаментальных проблем. Вдруг что... М. Франкенгейм опередил О. Браве на 10 лет, но посчитал одну моноклинную решетку дважды: один раз как базоцентрированную с прямоугольным основанием, другой — как примитивную с ромбическим основанием. История науки таких ошибок не прощает. Второй совет: перед опубликованием результаты на-

до обсуждать с коллегами. Что написано пером — потом не вырубишь топором...

5. «Простой, тихий и скромный» марбургский профессор И. Гессель (1796—1872) вывел все виды симметрии конечных фигур в 1829 г. (после него — Е. С. Федоров в 1883 г. и П. Кюри в 1884 г.) и опубликовал результат в местном малотиражном «Физическом словаре» в 1830 г. «Никто не станет утверждать, что последовательное развитие таких теорий бесполезно для науки. Никто также не будет меня порицать за то, что, помимо систем фигур, образующихся в мире кристаллов, здесь надлежащим образом разобраны также все мыслимые системы фигур» [50, с. 111]. Никто и не порицал, но издание не было замечено современниками. Лишь в 1890 г. ему воздал должное Л. Зонке (1842—1897). Генерал артиллерии А. В. Гадолин (1828—1892) независимо вывел 32 вида симметрии именно для кристаллов в 1867 г. (после него — Б. Миннигероде в 1887 г. и А. Шенфлис в 1891 г.) и скоро (благодаря минералогу Н. И. Кокшарову) стал известным, что подтверждено академической Ломоносовской премией и избранием в почетные члены Российского минералогического общества (1868). Вывод: актуальную проблему не надо топить в еще более общей проблеме, а солидный результат надо печатать в подходящем издании.

6. Число сингоний на текущий момент равно 7. Но еще век назад их было 6. После Е. С. Федорова из гексагональной была выделена тригональная со специальной ромбоэдрической установкой кристаллов. Но до сих пор и навсегда они связаны общей гексагональной установкой. Кристаллография и минералогия концептуально и методически быстро захватывают пограничные области. И вот уже в наших пределах появились не просто квазикристаллические сплавы [63], а природные, предположительно метеоритного происхождения квазикристаллы [52, 53], углеродные и металлокарбонные фуллерены [24] и даже икосаэдрические вирусы [19, 31, 61]. Пришло время учредить еще одну, додекаэдро-икосаэдрическую сингонию с 8 простыми формами. Е. С. Федоров [45] и В. В. Доливо-Добровольский [25] рассматривали их в ранге системы и указывали на связь с кубической сингонией. В формуле Браве $6L_5 10L_3 15L_2 15PC$ додекаэдра и икосаэдра есть $4L_3$ и $3L_2$, а еще 3 взаимно перпендикулярные плоскости, располагающиеся как в кубической сингонии. Простые формы додекаэдро-икосаэдрической системы — это комбинации некоторых простых форм кубической сингонии при углах между гранями, запрещенных решетчатым строением кристаллов.

7. Хорошо известно, что геометрических простых форм 47 (по Г. Б. Бокию, физических разновидностей 146, с учетом энантиоморфизма — 193, но не о них речь): в низшей категории — 7, в средней — 27, в высшей — 15. Но в сумме — 49! Почему? Потому что моноэдр и пинакоид учтены в низшей и средней категориях, т. е. дважды. Вопрос на зачете для нерадивого студента... Есть и более содержательный сюжет о простых формах. Однажды в уважаемом американском журнале было указано, что их 48 [62]. К тому времени только-только сформировалась и была опубликована российская систематика и номенклатура простых форм, точечных и пространственных групп симметрии [7, 54]. Реакция А. К. Болдырева была мгновенной. В статье [55] он показал, как важно следовать строгим определениям.



Планальный и аксиальный диэдры с геометрической точки зрения — одно и то же, а простых форм 47.

8. Сколько существует параллелоэдров Е. С. Федорова, т. е. выпуклых полиэдров, заполняющих пространство в параллельном положении грань к грани? С точностью до однородной деформации, сохраняющей параллельность прямых линий, их 5: трипараллелоэдр (куб), тетрапараллелоэдр (гексагональная призма с пинакоидом), 2 гексапараллелоэдра (ромбододекаэдр и «вытянутый ромбододекаэдр», из-за которого весь сыр-бор) и гептапараллелоэдр (архимедов кубооктаэдр). Но в разных работах указано то 5 [23], то 4 [41]. А причина снова в нестрогом следовании определениям. За подробностями отсылаем к статье [12].

9. Е. С. Федоров и А. Шенфлис поначалу ошиблись в числе пространственных групп (у первого — 228, у второго — 227), но поправили друг друга и законно делят честь открытия (230), ибо получили результат различными — геометрическим и алгебраическим — методами. Между тем эта фундаментальная теория четверть века была интеллектуальной игрушкой, пока ее не подтвердили расшифровки структур кристаллов рентгеновским методом. Мало известна история о том, что на предвоенном конгрессе кристаллографов звучал термин «группы Шенфлиса». Стараниями И. И. Шафрановского и Г. Б. Бокия были собраны документы, в том числе письма А. Шенфлиса, доказывающие приоритет Е. С. Федорова [6, 36, 58]. Они были сохранены И. И. Шафрановским в блокадном Ленинграде и распространены на первом послевоенном конгрессе. Вот почему имена первооткрывателей стоят сегодня в названии пространственных групп в должном порядке. Между прочим, в астрофизике есть закон: скорость удаления галактики за счет расширения вселенной прямо пропорциональна расстоянию до нее. На основе наблюдений этот закон получен Э. Хабблом в 1929 г. Но еще в 1922 г. А. А. Фридман и в 1927 г. Ж. Леметр вывели его из уравнений Эйнштейна. В 2018 г. на Генеральной ассамблее Международного астрономического союза принята резолюция о названии «закон Хаббла — Леметра». Не пора ли отечественным астрофизикам вмешаться?

10. Во время поездки 1842 г. по Европе, следовавшей за экспедицией Р. И. Мурчисона (1792—1871), в будущем почетного члена Российского минералогического общества (1867), по европейской части России (1840—1841) Н. И. Кокшаров (1818—1893), в будущем тоже почетный член Российского минералогического общества (1865), посетил в Париже Э. де Бомона (1798—1874), чтобы увидеть в его коллекции уникальный кристалл кварца с гранью пинакоида. Ведь она должна там быть как обладающая самой высокой ретикулярной плотностью! Увы, это оказался не пинакоид, а контактная поверхность [48]. Сегодня отсутствие пинакоида на кварце объясняется с точки зрения кристаллохимии и кинетики роста [2]. Взамен маленькой грани пинакоида щедрый Э. де Бомон предложил Н. И. Кокшарову огромный глобус с нарисованными им тектоническими швами, образующими ребра икосаэдра. Спешивший в театры и на балы молодой Н. И. Кокшаров предложил послать его в Санкт-Петербургский институт корпуса горных инженеров почтой. Известно, что глобус прибыл по назначению. Но где он?... А идея о Земле-икосаэдре (или дуальном

к нему додекаэдре) жива до сих пор, хотя имя автора идеи прочно забыто.

11. А. Г. Бетехтин [5] указал, что В. М. Севергин [40] сформулировал в понятии «смежность» то же, что и А. Брейтгаупт [57] в понятии «парагенезис». О. П. Иванов [27] правильно заметил, что не то же. Внимательное сравнение показывает, что парагенезис — частный случай смежности (закономерного сонахождения). Вторичные малахит и азурит по медной руде — тоже смежность, но не парагенезис. Таким образом, логически исчерпывающее и ясное соотношение минералов в пространстве и времени в понятиях минералообразующих процессов, этапов, стадий, генераций и т. д. еще не разработано. Лучшее рассуждение на эту тему — в статье [10].

12. Незаметно прошел 100-летний юбилей, на который уместно указать студентам, особенно геммологам, а также историкам и любителям минералогии. В 1919 г. вышла в свет адаптированная для широкого круга читателей диссертация М. Толковского [65]. В ней впервые рассчитана современная бриллиантовая огранка, сегодня носящая его имя. Чтобы осознать скачок, превративший искусство огранки алмаза в науку, достаточно сравнить эту работу с методическим руководством [66]. В интернете можно найти его также в издании 1924 г. Это показывает, что даже талантливая (впрочем, именно поэтому) работа не сразу доходит до широких масс. За подробностями отсылаем к статье [13].

Философия

О философии на почве кристаллографии, минералогии и петрографии ныне не говорит никто. Книга Б. К. Вайнштейна [9] — последняя, охватившая главные для своего времени методологические проблемы кристаллографии (в том числе минералогической, стало быть, отчасти и минералогии). Но ведь был философ, естественно рассуждавший о минералах и горных породах!

1. Рассматривая диалектику особенной и целостной индивидуальности, Г. В. Гегель приводит в пример строение кристалла по Р. Ж. Гаюи и поясняет: «Без всякого импульса со стороны тело носит в себе тайного, тихого геометра, который как вполне проникающая форма организует его вовне и внутри» [16, с. 219]. А вот о горной породе: «Гранит состоит, как известно, из кремня, кварца, абсолютной земли, хрупкой точечности; из слюды — поверхности, развивающейся в противоположность раскрывающейся точечности; момента горючести, содержащего в себе зародыш всех абстракций; и, наконец, из полевого шпата — намечающейся нейтральности» [16, с. 377]. А вот о геологическом процессе: «Смысл и дух процесса составляет внутренняя связь, необходимое соотношение этих образований, к которому последовательность ничего не прибавляет. Требуется познать всеобщий закон этой последовательности формаций, не прибегая к форме истории, — вот что существенно, вот что разумно и единственно интересно для понятия; надо познать в данной последовательности черты понятия. <...> Внутренняя связь существует в настоящем как рядоположность, и она должна зависеть от свойств, от содержания самих этих образований. <...> Весь интерес

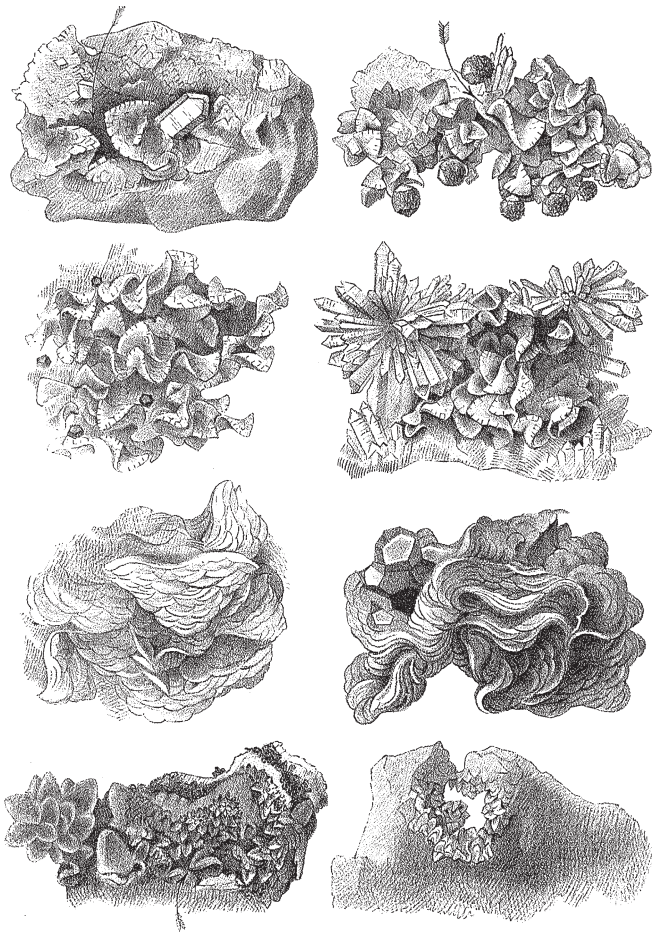


Рис. 1. Одно из первых в истории минералогии исследование гиперболоидов и геликоидов доломита [56]. Различимы также кристаллы кварца и пирита

Fig. 1. One of the first studies of hyperboloids and helicoids of dolomite in the history of mineralogy [56]. Quartz and pyrite crystals are also distinguishable

заключается в том, что существует налицо в этой системе различных образований» [16, с. 372–373]. Он был последним философом, владевшим всеми научными знаниями своего времени. Понять его бывает трудно, но пытаться нужно. Оно того стоит.

Рядом с ним о граните философствовал И. В. Гете: «От всех прочих каменных пород эта достойная всякого внимания порода отличается тем, что, хотя она не простая и состоит из видимых частей, уже при первом взгляде заметно, что они не соединены посредством чего-либо третьего, а просто соприкасаются или соседствуют, взаимно поддерживая друг друга. Укажем эти части, которые следует ясно различать: кварц, полевой шпат и слюда. <...> Если точно изучить эти части, то, в отличие от того, как думают о частях обычно, мы получим впечатление, что у гранита до самого целого никаких частей не было: они выглядят не сложенными, не сведенными в одно целое, а возникшими вместе с тем целым, которое составляют. <...> Мы со всей ясностью видим, что гранит возник путем непрерывной, уже исходно внутренне компактной кристаллизации» [17]. Замечательный пример системного взгляда на горную породу!

Говоря со студентами о философии, уместно задать вопрос о ее предмете. Некогда бытовала форму-

лировка, будто философия — наука о наиболее общих законах развития природы, общества и мышления. Полагаю, не совсем так. Предмет философии — законы мышления. А уж в ходе мышления она обращается к природе, обществу и самому мышлению. И тут надо сказать о формальной и диалектической логиках. Это только кажется далеким от наших наук. Р. Ж. Гаюи складывал кристаллы из спайных выколов формально — и его гипотеза себя изжила. О. Браве поступил диалектически, заменив строительные кирпичи точками, и направил кристаллографию по другому пути к современной теории.

2. В поле зрения студентов попадают странные объекты, захваченные кристаллографией и минералогией: давно известные кристаллы доломита в форме гиперболических параболоидов и геликоидов [56] (рис. 1), недавно открытые квазикристаллические сплавы и полиэдрические фуллерены с икосаэдрической симметрией [24]... Для них есть стандартные объяснения. Но юношество тяготеет к объяснениям нестандартным... И вот кристалл доломита требует для себя пространства с отрицательной кривизной. Поскольку оно локально евклидово, то маленький кристалл растет с плоскими гранями, но с некоторого размера его буквально корезит [15]. Кристаллы с ростовой зональностью якобы идеальны в римановом пространстве [38]. А квазикристаллы и фуллерены — специальные (иррациональные) проекции идеальных кристаллов из 6-мерного пространства в 3-мерное [59]. Студентам следует объяснить, что математика легко вставляет 3-мерные евклидовы объекты в весьма общие логически непротиворечивые многомерные и неевклидовы конструкции, здесь нет мистики. Но математические возможности фильтруются физическими реалиями.

3. Кстати о мистике. «Шведский же философ и натуралист И. Сведенборг (1688—1772) оставил по себе память главным образом как фанатичный мистик, пытавшийся проникнуть в “тайны потустороннего мира”. <...> В сочинениях по натурфилософии Сведенборг развивал чрезвычайно сложные и путанные воззрения на строение материи» [49, с. 156]. О нем писали И. Кант [29] и Н. Бердяев [4], но именно как о последователе мистика Я. Бёме. А ведь до духовного превращения, случившегося в один день, он был естествоиспытателем, писал статьи о минералогии пещер. В книге [64, с. 45] есть подстрочное примечание, в котором А. Э. Норденшельд (1832—1901), иностранный почетный член Российского минералогического общества (1875), характеризует И. Сведенборга: «Известен в истории естественных наук различными выдающимися для своего времени геологическими работами, замечательной работой по атомной теории, некоторыми исследованиями в области кристаллографии, крупнейшим и наиболее полным справочником по металлургии того времени и т. д.» (пер. с англ. наш. — Ю. В.). Это не согласуется с оценкой И. И. Шафрановского и побуждает к историко-философскому исследованию.

4. Логика познания кристалла развивалась от правильности огранки к правильности структуры. Плиний Старший первый сказал, что кристалл в идеале следует рассматривать как выпуклый полиэдр. Мысль замечательная, потерянная на 16 столетий, вспыхнувшая снова как очевидная. Замечательную диалектическую мысль о природных формах находим у К. Ф. Науманна:

«Индивиды минерального царства <...> появляются лишь в более или менее угнетенных или искалеченных формах <...> которые большей частью не имеют никакого отношения к тем кристаллическим формам, над созданием которых природа, в сущности, трудилась в каждом индивиде» [60] (*пер. с нем. наш. — Ю. В.*). Сегодня мы знаем, что именно структура определяет форму: точечные группы симметрии (32) есть фактор-группы пространственных групп (230) по подгруппам трансляций. Противоречие диалектическое и снимается тем, что всякий элемент структуры некогда был элементом поверхности. С другой стороны, по Г. В. Гегелю, мышление лишь в целом эквивалентно природе. А в истории науки отражения «саморазвивающегося духа» могут проявляться в обратном порядке.

5. Д. П. Григорьев определил понятие «минеральный агрегат»: «Природное тело, сложенное из минералов, т. е. кристаллов, получившее естественно форму и величину, состав и строение в ходе единого процесса кристаллизации от момента зарождения тела и до завершения роста при сопутствующих и последующих явлениях частичного его преобразования, но с сохранением непрерывности тела» [22]. Это не понятие, а эмпирическое обобщение. Понятие требует сохранить в формулировке самую суть. Но суть минерального агрегата (вслушаемся в слово!) — в агрегации минеральных индивидов без отсылок к процессу (см. выше слова Г. В. Гегеля о смысле и духе процесса) и философских банальностей (вспомним Б. Спинозу: все сущее явлено в атрибутах протяженности или мышления; поэтому минеральный агрегат протяжен и в качестве модусов уже имеет форму, величину, состав, строение...). Примеры понятий в кристаллографии: гемметрическая простая форма, решетка, правильная система точек... и никакого генезиса, который появляется не ранее чем в кристаллохимии. К минеральному агрегату тоже нетрудно подобрать понятие: автоморфизм множества минеральных видов реализованных в минеральных индивидах, через их контактирование. Такова диалектика двух фундаментальных понятий (индивида и вида) в минеральном агрегате. В чем специфика горной породы? В том ли, что она — большой минеральный агрегат, слагающий геологические тела? Формально — да. По сути — в том, что от горной породы мы ожидаем структуры как устойчивой статистики межзерновых отношений, которой еще нет у сростков нескольких минеральных индивидов.

6. Соотношение категорий минерального индивида и вида в «Онтогении минералов» Д. П. Григорьева [20, 21] — вопрос архиважный. Казалось бы, вид есть абстракция, снятая с индивидов, взятых во множестве, по сходству характеристик. (А если представить вид, явленный на планете в одном крохотном индивиде? Методологической проблемы здесь нет, но это кошмар для первооткрывателей новых минералов, ведь одну крошку надо отдать в музей им. А. Е. Ферсмана, другую послать в ММА...) На самом деле индивид данной категории не может существовать один (в биологии и палеонтологии этот принцип считается очевидным). Он рожден в системе себе подобных в результате разрешения от бремени некоторой физико-химической системы. Поэтому индивид подразумевает наличие вида, который наше познающее мышление лишь узнает в популяции индивидов...

7. Кристаллография как методологически последовательная, написанная на математическом языке теория может оказать помощь близким наукам — минералогии и петрографии. Например, для описания кристаллической решетки и в фундаментальной теории пространственных групп применяется трансляция. Как преобразование симметрии она не должна выводить структуру из себя. Следовательно, кристалл надо мыслить бесконечным. Но каждый природный кристалл конечен! Противоречие разрешается тем, что мы встречаем его в конечной точке пространственно-временной онтогенетической траектории, устремленной в бесконечность. Но должна ли горная порода в фундаментальной петрографической теории тоже мыслиться бесконечной? Казалось бы, да, раз уж она сложена бесконечными индивидами. Но такое суждение — методологически неправильная аналогия. Дело в другом. Структура горной породы, если она определена через статистику межзерновых отношений (а именно так она и должна быть определена), требует перехода от частот, снимаемых с конечных образцов (штуфов, шлифов), к вероятностям. А предельный переход требует бесконечного числа межзерновых контактов, следовательно, бесконечного числа минеральных индивидов, т. е. бесконечно протяженной горной породы. Архимед в мысленном эксперименте [1] засыпал мир песком до сферы неподвижных звезд. Ему понадобилось 10^{63} песчинок. Р. Ташнер [44, с. 49—53] пошел дальше и заполнил вселенную «планковскими кубиками» грань к грани (и здесь федоровские параллелоэдры!) «до горизонта событий». Ему понадобилось 10^{186} кубиков. Мы же устремили «сферу неподвижных звезд» в бесконечность и получили зернистое петрографическое пространство счетной (алеф-нуль) мощности. Будущая петрография не сможет обойтись без этой логической конструкции в фундаментальной структурной теории.

8. Д. П. Григорьев одолжил краеугольный термин своего учения у биологов по очевидному сходству. Как и живой организм в онтогенезе, кристалл претерпевает индивидуальное развитие: зарождается, растет, изменяется, разрушается. Нам представляется, что дело здесь не только в аналогии. Профессор очень любил древних греков и побуждал своих студентов изучать их мифологию весьма эффективным способом — нельзя было сдать экзамен по минералогии, не зная, зачем у входа в Горный институт Геракл борется с Антеем, Плутон похищает Прозерпину, а на фризе Гефест кует доспехи Марсу. И ведь выкруливал на эти темы, какой бы билет студенту не достался... Он никогда не излагал свои философские предпочтения. Но представляется, что смотрел на мир как древний грек: весь мир — самодвижущийся, саморазвивающийся организм. Мир — не картезианская машина, с которой непонятно как совместить душу... А минерал как организм и учение об онтогении минералов — лишь следствие из цельного мировоззрения. Об источнике развития вселенной рекомендуем яркую и необычную работу трагического философа Э. Ильенкова [28]. Философские подоплеку естественно-научных идей — замечательная тема для обсуждения со студентами.

9. Кроме онтогении в минералогии говорят о филогении [26]. Есть ли она в минералогии? Представляется, что нет. «Но нет ее и выше», в учении о месторождениях полезных ископаемых [39]. Эта аналогия с био-



логией проведена формально. Все геологические тела представляют собой совокупности минеральных парагенезисов, устойчивых или неустойчивых в тех или иных условиях. Логика образования минерального парагенезиса — кристаллизация расплава, раствора, геля... по законам термодинамики и физической химии. Логика метаморфизма — приведение парагенезисов к новому устойчивому состоянию. Логика эволюции земной коры в целом — круговорот вещества, не более того. Биологическая филогения однонаправлена и необратима, ничего подобного с минералами, парагенезисами и геологическими формациями в истории планеты не происходило, а полиморфы вообще могут превращаться друг в друга и обратно. В этом вопросе минералоги и геологи переусердствовали, не желая уступать биологам в глубине своего учения.

10. Интересная тема — о формировании сознания при исследовании природы. Человек вполне понимает в природе лишь то, что научился прогнозировать и воспроизводить. Из этого следует большое значение теории и практики синтеза кристаллических веществ для миропонимания кристаллографа и минералога. Д. П. Григорьев совершил решительный и рискованный для профессиональной карьеры шаг, перейдя к созданию «Онтогении минералов» после успешной защиты докторской диссертации по синтезу породообразующих минералов с летучими компонентами (1943). Рискнул — и в истории науки выиграл... Но академическое сообщество невысоко оценило это учение. В архиве Российского минералогического общества сохранилось письмо Д. С. Коржинского: «10 мая 1958 г. Дорогой Дмитрий Павлович, меня очень огорчило и удивило, что Горный институт не выдвинул Вас в чл.-корр. Я твердо на выдвижение рассчитывал. Придется мне выдвигать Вас единолично. <...> Неизвестно, что из этого получится. <...> Все ценят Ваши экспериментальные успехи, но многие считают, что последующие Ваши работы хотя и интересны, но пока еще не дали выдающихся результатов». Как известно, избрание в АН СССР не случилось.

11. В иерархии предельных групп симметрии П. Кюри (7, с учетом энантиоморфизма — 10) самая низшая отвечает вращающемуся конусу (∞). Но она не примитивна (1), как в иерархии подгрупп любой группы. Проблема не в том, чтобы добавить примитивную группу формально, а в том, что она должна характеризовать некоторую физическую среду земной реальности. Наша идея состоит в том, чтобы примитивную группу приписать биологической среде как носительнице жизни. Ее особенность — мгновенная изменчивость. Именно она не позволяет даже в мысли совершить автоморфизм, совмещающий систему с собой даже через какое угодно малое время. Кажется, на этот нюанс никто ранее не обращал внимания.

12. Происхождение жизни — проблема на все времена. Современные научные гипотезы, следуя Аристотелю, хотят зримого начала жизни на нашей или другой (хочется, чтоб на нашей) планете: в концентрированном бульоне [35], в пепловой туче при извержении вулкана [33], на низкотемпературном излете гидротермальной системы [51]. Но вспомним В. И. Вернадского [11], принимавшего принцип Ф. Реди (1626—1697) *omne vivum e vivo*, т. е. живое из живого. Он отодвигает зарождение жизни в бесконечность, т. е.

уничтожает ее начало. Мир и жизнь в нем были всегда. Такое понимание — не для слабых умов. Бесконечность в конечный ум не укладывается, но думать об этом и формировать научное мировоззрение студент-геолог должен. И еще заметим: по ходу рассуждений актуальная бесконечность встретила нас трижды — в решетке идеального кристалла, в структуре идеальной горной породы, во времени существования жизни. Нам зачем-то нужно погрузить корни мыслимых феноменов в бесконечность. Разве это не органичная потребность в философии?

Заключение

За пять минут на лекции много не расскажешь. Каждый сюжет — интрига, провокация, побуждающая студентов к чтению серьезной литературы. Но есть и хорошая научно-популярная литература с яркими описаниями минералогических и геологических феноменов. Рекомендуем: Смилевский [42] — задушевный разговор героя с духом Б. Спинозы о принципах философии природы; Флорин [46] — романтическая биография К. Линнея, пытавшегося тоже построить систему минералов; Рёскин [37] — популярное изложение основ кристаллографии в 10 беседах («Жизнь кристалла», «Формы кристаллов», «Ссоры кристаллов», «Капризы кристаллов», «Невзгоды кристаллов»...) «для маленьких девочек»; Кивеля [30] — романтическая история современницы, то ли садовода, то ли ландшафтного дизайнера, в грустные моменты жизни обращаясь к снежинкам и находящей успокоение в истории кристаллографии; Бьёрнсдоттир [8] — еще одна история современницы, вулканолога из Рейкьявика, у которой под ногами и в сердце вот-вот взорвется вулкан; наконец, Мейерсон [34] — детективная история для геммологов (эта специализация недавно появилась на геологических факультетах наших университетов, определенно указывая на рост благосостояния нации) об историческом пропавшем бриллианте «Флорентиец». Но интрига сработает лишь тогда, когда преподаватель сам увлечен кристаллографией и минералогией...

Автор благодарит д. ф. н. А. Н. Муравьева, д. г.-м. н. Б. Е. Буракова и А. О. Дудина за обсуждения философских тем на заседаниях методологического семинара при НПО «Радиевый институт им. А. Г. Хлопина», г. Санкт-Петербург.

Литература

1. *Архимед*. Исчисление песчинок. Псаммит. М.; Л.: Гостехиздат, 1932. 104 с.
2. *Асхабов А. М.* Морфология субпинакоидальных поверхностей природных кристаллов кварца // Зап. ВМО. 1979. № 6. С. 712—716.
3. *Банн Ч.* Кристаллы. Их роль в природе и науке. М.: Мир, 1970. 312 с.
4. *Бердяев Н.* Этюды о Якобе Бёме. СПб.: Умозрение, 2021. 72 с.
5. *Бетехтин А. Г.* Понятие о парагенезисе минералов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1949. № 2. С. 15—20.
6. *Бокий Г. Б., Шафрановский И. И.* Из переписки Е. С. Федорова с А. Шенфлисом. Научное наследство. М.: Изд-во АН СССР, 1951. Т. 2. С. 314—340.



7. Болдырев А. К., Доливо-Добровольский В. В. Классификация, номенклатура и символика 32 видов симметрии кристаллографии // Зап. ЛГИ. 1934. Т. VIII. С. 145—159.
8. Бьёрнстотир С. Х. Вулканы, любовь и прочие бедствия. СПб.: Polyandria No Age, 2022. 351 с.
9. Вайнштейн Б. К. (отв. ред.) Методологические проблемы кристаллографии. М.: Наука, 1985. 296 с.
10. Васильев В. И., Драгунов В. И., Рундквист Д. В. «Парагенезис минералов» и «формация» в ряду образованных различных уровней организации // Зап. ВМО. 1972. № 3. С. 281—289.
11. Вернадский В. И. Философские мысли натуралиста. М.: Наука, 1988. 520 с.
12. Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. В. Федоровские параллелоэдры // Вестник геонаук. 2020. № 7(307). С. 26—31.
13. Войтеховский Ю. Л. 100 лет «Дизайну алмазов» М. Толковского // Зап. РМО. 2022. № 2. С. 102—109.
14. Ворошилов Ю. В., Довгий С. А., Павлишин В. И. Кристаллография в лицах. Этюды по истории науки. Киев: Информационные системы, 2013. 398 с.
15. Галиулин Р. В. Кристаллографическая картина мира // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172. № 2. С. 229—233.
16. Гегель Г. В. Энциклопедия философских наук. Т. 2. Философия природы. М.: Мысль, 1975. 696 с.
17. Гете И. В. Гранит как основание всякого геологического формирования // Научные сочинения. Т. 2. Общие вопросы естествознания. Минералогия и геология. Метеорология. Материалы к учению о звуке. М.: Изд-во КМК, 2018. С. 155—156.
18. Гинзбург М. Я. Стиль и эпоха: проблемы современной архитектуры. М.: Гос. изд-во, 1924. 239 с.
19. Гнутова Р. В. Современные тенденции в таксономии и номенклатуре вирусов // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 6. С. 563—577.
20. Григорьев Д. П. Онтогенез минералов. Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1961. 284 с.
21. Григорьев Д. П. Естественные объекты минералогии: минеральные индивиды и минеральные виды // Зап. ВМО. 1975. № 4. С. 513—514.
22. Григорьев Д. П. Уточнение понятия «минеральный агрегат» // Зап. ВМО. 1985. № 4. С. 506—509.
23. Делоне Б. Н. Е. С. Федоров как геометр // Тр. ИИЕТ АН СССР. 1956. Т. 10. С. 5—12.
24. Деффейс К., Деффейс С. Удивительные наноструктуры. М.: Бином, 2011. 206 с.
25. Доливо-Добровольский В. В. Исследование додекаэдро-икосаэдрической системы // Зап. РМО. 1924. № 1. С. 169—181.
26. Жабин А. Г. Проблемы филогении минералов // Генетическая информация в минералах. Сыктывкар: ИГ КФ АН СССР, 1980. С. 10—12.
27. Иванов О. П. «Смежность минералов» и «парагенезис»: предвосхитил ли В. М. Севергин А. Брейгаупта? // Зап. РМО. 2005. № 1. С. 44—45.
28. Ильенков Э. Космология духа // От абстрактного к конкретному. Крутой маршрут. 1950—1960. М.: Канон+, 2017. С. 127—166.
29. Кант И. Грезы духовидца, поясненные грезами метафизики // Соч. в 6 т. М.: Мысль, 1964. Т. 2. С. 293—355; Письмо о Сведенборге к фрейлейн Ш. фон Кноблех // Там же, с. 355—360; Письмо к М. Мендельсону // Там же, с. 363—367.
30. Кивеля М. Ты или никогда. М.: Гаятри, 2011. 240 с.
31. Костюченко В. А., Месянжинов В. В. Архитектура сферических вирусов // Успехи биол. химии. 2002. Т. 42. С. 177—192.
32. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. 656 с.
33. Мархинин Е. К. Вулканы и жизнь: проблемы био-вулканологии. М.: Мысль, 1980. 196 с.
34. Мейерсон Э. Несовершенства. СПб.: Polyandria No Age, 2022. 511 с.
35. Опарин А. И. Возникновение жизни на Земле. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 267 с.
36. Пауфлер П., Филатов С. К. Развитие Е. С. Федоровым российско-германских научных связей // Зап. РМО. 2020. № 5. С. 112—134.
37. Рёскин Дж. Этика пыли. Десять лекций маленьким домохозяйкам об элементах кристаллизации. М.: Ad Marginem Press, 2016. 176 с.
38. Руднев С. В. Применение эллиптической геометрии Римана к исследованию решетчатых структур реальных кристаллов. Л.: ЛГУ, 1986. 18 с.
39. Рундквист Д. В. Вопросы изучения филогенеза месторождений полезных ископаемых // Зап. ВМО. 1968. № 2. С. 191—209.
40. Севергин В. М. Первые основания минералогии или естественной истории ископаемых тел. В 2 кн. СПб., 1798. Кн. 1. 498 с.
41. Силаев В. И., Асхабов А. М., Хазов А. Ф., Юхтанов П. П. Янулов. К 100-летию воина и замечательного кристаллографа // Вестник геонаук. 2020. № 3. С. 33—43.
42. Смилевский Г. Разговор со Спинозой. М.: Центр книги Рудомино, 2019. 192 с.
43. Стенон Н. О твердом, естественно содержащемся в твердом. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 151 с.
44. Ташнер Р. Число, пришедшее с холода: когда математика становится приключением. М.: Колибри, 2018. 256 с.
45. Федоров Е. С. Практикум по основным отделам кристаллографии. Петроград: Экон. типолитография, 1915. 20 с.
46. Флорин М. Сад. СПб.: Изд-во И. Лимбаха, 2005. 160 с.
47. Шаскольская М. П., Шафрановский И. И. Рене Жюст Гаюи. М.: Наука, 1981. 153 с.
48. Шафрановский И. И. Николай Иванович Кокшаров. М.; Л.: Наука, 1964. 216 с.
49. Шафрановский И. И. История кристаллографии с древнейших времен до начала XIX столетия. Л.: Наука, 1978. 297 с.
50. Шафрановский И. И. История кристаллографии. XIX век. Л.: Наука, 1980. 324 с.
51. Юшкин Н. П. Биоминеральные взаимодействия. М.: Наука, 2002. 60 с.
52. Bindi L., Steinhardt P. J., Yao N., Lu P. J. Natural quasicrystals // Science. 2009. V. 324. N 5932. P. 1306—1309.
53. Bindi L., Steinhardt P. J., Yao N., Lu P. J. Icosahedrite, Al₆₃Cu₂₄Fe₁₃, the first natural quasicrystal // American Mineralogist. 2011. V. 96. P. 928—931.
54. Boldyrev A. K. Die von Fedorov Institut angenommene kristallographische Nomenklatur // Zeitschrift für Kristallographie. 1925. Bd. 62. S. 145—150.
55. Boldyrev A. K. Are there 47 or 48 simple forms possible on crystals? // American Mineralogist. 1936. V. 21. No. 11. P. 731—734.
56. Bombicci L. Sulle superficie elicoidi e paraboloidi nei romboedri detti selliformi di dolomite e di altri carbonate anidri. Bologna: Tip. Gamberini e Parmeggiani, 1885. 15 p.



57. Breithaupt A. Die Paragenesis der Mineralien, mineralogisch, geognostisch und chemisch beleuchtet mit besonderer Rücksicht auf Bergbau. Freiberg: Verlag von J. G. Engelhardt, 1849. 277 S.

58. Burckhardt J. J. Der Briefwechsel von E. S. von Fedorov und A. Schoenflies, 1889—1908 // Archive vor History of Exact Sciences. 1971. Vol. 7. N 2. P. 91—141.

59. Engel P. On two special classes of parallelohedra in E6 // Acta Crystallographica. 2019. A75. P. 574—583.

60. Naumann C. F. Elemente der Mineralogie. Leipzig: Verlag von W. Engelmann, 1907. 821 S.

61. Pimonov V. V., Konevtsova O. V., Rochal S. B. Anomalous small viral shells and simplest polyhedra with icosahedral symmetry: the rhombic triacontahedron case // Acta Crystallographica. 2019. A75. P. 135—141.

62. Rogers A. F. A tabulation of crystal forms and discussion on form names // American Mineralogist. 1935. V. 20. No. 12. P. 838—851.

63. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J. W. Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry // Physical Review Letters. 1984. V. 53. N 20. P. 1951—1953.

64. Stroh A. H. Emanuel Swedenborg as a scientist. Stockholm: Aftonbladets Tryckeri, 1908. 112 p.

65. Tolkovsky M. Diamond design. A study of the reflection and refraction of light in a diamond. London—New York: Spon & Chamberlain, 1919. 104 p.

66. Vervoort L. Der Diamant, seine Eigenschaften und seine Bearbeitung. Antwerpen: Druckerei «Phenix», 1910. 52 S.

References

1. Archimedes. *Ischisleniye peschinok. Psammit* (Calculus of sand grains. Psammit). Moscow, Leningrad: Gostekhizdat, 1932, 104 pp.

2. Askhabov A. M. *Morfologiya subpinakoidal'nykh poverkhnostey prirodnykh kristallov kvartsa* (Morphology of subpinakoidal surfaces of natural quartz crystals). Proc. Rus. Miner. Soc., 1979, 6, pp. 712—716.

3. Bann Ch. *Kristally. Ikh rol' v prirode i nauke* (Crystals. Their role in nature and science). Moscow: Mir, 1970, 312 pp.

4. Berdyayev N. *Etyudy o Jakobe Boeme* (Etudes about Jacob Boeme). St. Petersburg: Publ. House «Umozreniye», 2021, 72 pp.

5. Betekhtin A. G. *Ponyatiye o paragenезise mineralov* (The concept of paragenesis of minerals). Bull. Acad. Sci. USSR. Ser. geol., 1949, 2, pp. 15—20.

6. Bokiy G. B., Shafranovskiy I. I. *Iz perezpiski E. S. Fedorova s A. Shenflisom. Nauchnoye nasledstvo*. (From the correspondence of E. S. Fedorov with A. Schoenflies. Scientific heritage). V. 2, Moscow: USSR Acad. Sci., 1951, pp. 314—340.

7. Boldyrev A. K., Dolivo-Dobrovolsky V. V. *Klassifikatsiya, nomenklatura i simbolika 32 vidov simmetrii kristallografii* (Classification, nomenclature and symbolism of 32 types of crystallographic symmetry). Proc. St. Petersburg Mining Institute, 1934, VIII, pp. 145—159.

8. Bjornsdittir S. H. *Vulkany, lyubov i prochiye bedstviya*. (Volcanoes, love and other disasters). St. Petersburg: Polyandria No Age, 2022, 501 pp.

9. Weinstein B. K. (ed.) *Metodologicheskiye problemy kristallografii*. (Methodological problems of crystallography). Moscow: Nauka, 1985, 296 pp.

10. Vasiliev V. I., Dragunov V. I., Rundquist D. V. «Paragenезis mineralov» i «formatsiya» v ryadu obrazovaniy

razlichnykh urovney organizatsii (“Paragenesis of minerals” and “formation” in a row of formations of various levels of organization). Proc. Rus. Miner. Soc., 1972, 3, pp. 281—289.

11. Vernadsky V. I. *Filosofskiyе mysli naturalista* (Philosophical thoughts of a naturalist). Moscow: Nauka, 1988, 520 pp.

12. Voytekhovskiy Yu. L. *Iz opyta prepodavaniya. V. edorovskiyе paralleloedry* (From teaching experience. V. Fedorov's parallelohedra). Vestnik of Geosciences, 2020, 7(307), pp. 26—31. DOI: 10.19110/geov.2020.7.4.

13. Voytekhovskiy Yu. L. *100 let «Dizaynualmazov» M. Tolkovskogo* (100 years of Marcel Tolkovsky's “Diamond Design”). Proc. Rus. Miner. Soc., 2022, 2, pp. 102—109. DOI: 10.31857/S0869605522020101.

14. Voroshilov Yu. V., Dovgiy S. A., Pavlishin V. I. *Kristallografiya v litsakh. Etyudy po istorii nauki* (Crystallography in faces. Studies on the history of science). Kiev: Information Systems, 2013, 398 pp.

15. Galiulin R. V. *Kristallograficheskaya kartina mira* (Crystallographic picture of the world). Advances in physical sciences, 2002, 172, 2, pp. 229—233.

16. Hegel G. V. *Entsiklopediya filosofskikh nauk. T. 2. Filosofiya prirody* (Encyclopedia of philosophical sciences. Vol. 2. Philosophy of nature). Moscow: Mysl, 1975, 696 pp.

17. Goethe I. V. *Granit kak osnovaniye vsyakogo geologicheskogo formirovaniya* (Granite as the foundation of any geological formation). Scientific works. V. 2. General questions of natural science. Mineralogy and geology. Meteorology. Materials for the doctrine of sound. Moscow: KMK, 2018, pp. 155—156.

18. Ginzburg M. Ya. *Stil' i epokha: problemy sovremennoy arkhitektury* (Style and epoch: problems of modern architecture). Moscow: State Publ. House, 1924, 239 pp.

19. Gnutova R. V. *Sovremennyye tendentsii v taksonomii i nomenklature virusov* (Modern trends in taxonomy and nomenclature of viruses). Advances in modern biology, 2011, 131, 6, pp. 563—577.

20. Grigoriev D. P. *Ontogeniya mineralov* (Ontogeny of minerals). L'vov: University Publ. House, 1961, 284 pp.

21. Grigoriev D. P. *Yestestvennyye obyekty mineralogii: mineralnyye individy i mineral'nyye vidy* (Natural objects of mineralogy: mineral individuals and mineral species). Proc. Rus. Miner. Soc., 1975, 4, pp. 513—514.

22. Grigoriev D. P. *Utochneniye ponyatiya «mineralnyy agregat»* (Clarification of the concept of „mineral aggregate“). Proc. Rus. Miner. Soc., 1985, 4, pp. 506—509.

23. Delaunay B. N. E. S. *Fedorov kak geometr* (Fedorov as a geometer). Works of the IIET USSR Acad. Sci., 1956, 10, pp. 5—12.

24. Defface K., Defface S. *Udivitelnyye nanostruktury* (Amazing nanostructures). Moscow: Binom, 2011, 206 pp.

25. Dolivo-Dobrovolsky V. V. *Issledovaniye dodekaedro-ikosaedricheskoy sistemy* (Investigation of the dodecahedron-icosahedral system). Proc. Rus. Miner. Soc., 1924, 1, pp. 169—181.

26. Zhabin A. G. *Problemy filogenii mineralov* (Problems of mineral phylogeny). Genetic information in minerals. Syktyvkar: Inst. of Geology KF USSR Acad. Sci., 1980, pp. 10—12.

27. Ivanov O. P. «Smezhnost' mineralov» i «paragenезis»: predvoskhital li V. M. Severgin A. Breygaupta? (“Contiguity of minerals” and “paragenesis”: Did V. M. Severgin anticipate A. Breygaupt?) Proc. Rus. Miner. Soc., 2005, 1, pp. 44—45.

28. Ilyenkov E. *Ot abstraktnogo k konkretnomy. Krutoy marshrut*. (From the abstract to the concrete. A steep route). Moscow: Canon+, 2017, 384 pp.



29. Kant I. *Grezy dukhovidtsa, poyasnennyye grezami metafiziki* (The dreams of the visionary, explained by the dreams of metaphysics). Works in 6 vol. Moscow: Mysl, 1964, V. 2, pp. 293–355; Letter about Swedenborg to Sh. von Knobloch, *Ibid.*, pp. 355–360; Letter to M. Mendelson, *Ibid.*, pp. 363–367.
30. Kivelya M. *Ty ili nikogda* (You or never). Moscow: Gayatri, 2011, 240 pp.
31. Kostyuchenko V. A., Mesyanzhinov V. V. *Arkhitektura sfericheskikh virusov* (Architecture of spherical viruses). Advances in biological chemistry. 2002, 42, pp. 177–192.
32. Mandelbrot B. *Fraktalnaya geometriya prirody* (Fractal geometry of nature). Moscow: Institute of Computer Research, 2002, 656 pp.
33. Markhinin E. K. *Vulkany i zhizn: problemy biovolkanologii* (Volcanoes and life: problems of biovolcanology). Moscow: Mysl, 1980, 196 pp.
34. Meyerson E. *Nesovershenstva* (Imperfections). St. Petersburg: Polyandria No Age, 2022, 511 pp.
35. Oparin A. I. *Voznikoveniye zhizni na Zemle* (The origin of life on Earth). Moscow; Leningrad: USSR Acad. Sci., 1941, 267 pp.
36. Paufler P., Filatov S. K. E. S. *Razvitiye Ye. S. Fedorovym rossiysko-germanskikh nauchnykh svyazey* (Fedorov's development of Russian — German scientific relations). Proc. Rus. Miner. Soc., 2020, 5, pp. 112–134.
37. Ruskin J. *Etika pyli. Desyat' lektsiy malen'kim domokhozyaikam ob elementakh kristallizatsii*. (The ethics of dust. Ten lectures to little housewives about the elements of crystallization). Moscow: Ad Marginem Press, 2016, 176 pp.
38. Rudnev S. V. *Primeneniye ellipticheskoy geometrii Rimana k issledovaniyu reshetchatykh struktur real'nykh kristallov*. (Application of Riemann elliptic geometry to the study of lattice structures of real crystals). Leningrad: State University, 1986, 18 pp.
39. Rundquist D. V. *Voprosy izucheniya filogeneza mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* (Questions of studying the phylogeny of mineral deposits). Proc. Rus. Miner. Soc., 1968, 2, pp. 191–209.
40. Severgin V. M. *Pervye osnovaniya mineralogii ili yestestvennoy istorii iskopayemykh tel, v dvukh knigakh*. (The first foundations of mineralogy or the natural history of fossil bodies, in two books). Book 1. St. Petersburg, 1798, 498 pp.
41. Silaev V. I., Askhabov A. M., Khazov A. F., Yukhtanov P. P., Yanulov. K 100-letiyu voyna i zamechatel'nogo kristallografa (100th anniversary of the warrior and the wonderful crystallographer). Vestnik of Geosciences, 2020, 3, pp. 33–43. DOI: 10.19110/geov.2020.3.5.
42. Smilevsky G. *Razgovor so Spinozoy* (Conversation with Spinoza). Moscow: Rudomino Book Center, 2019, 192 pp.
43. Stenon N. *O tverdom, yestestvenno sodержaschemsya v tverdom* (On the solid naturally contained in the solid). Moscow: USSR Acad. Sci., 1957, 151 pp.
44. Tashner R. *Chislo, prishedshee s kholoda: kogda matematika stanovitsya priklyucheniym*. (The number that came from the cold: when mathematics becomes an adventure). Moscow: Kolibri, 2018, 256 pp.
45. Fedorov E. S. *Praktikum po osnovnym otdelam kristallografii*. (Workshop on the main parts of crystallography). Petrograd: Economic typolithography, 1915, 20 pp.
46. Florin M. *Sad* (Garden). St. Petersburg: I. Limbach Publ. House, 2005, 160 pp.
47. Shaskolskaya M. P., Shafranovsky I. I. *Rene Zhust Gayui* (René Just Haüy). Moscow: Nauka, 1981, 153 pp.
48. Shafranovsky I. I. *Nikolay Ivanovich Koksharov* (Nikolay Ivanovich Koksharov). Moscow; Leningrad: Nauka, 1964, 216 pp.
49. Shafranovsky I. I. *Istoriya kristallografii s drevneyshikh vremen do nachala XIX stoletiya* (The history of crystallography from ancient times to the beginning of the XIX century). Leningrad: Nauka, 1978, 297 pp.
50. Shafranovsky I. I. *Istoriya kristallografii. XIX vek* (The history of crystallography. XIX century). Leningrad: Nauka, 1980, 324 pp.
51. Yushkin N. P. *Biominerallye vzaimodeystviya* (Biomineral interactions). Moscow: Nauka, 2002, 60 pp.
52. Bindi L., Steinhart P. J., Yao N., Lu P. J. Natural quasicrystals. Science, 2009, V. 324, No. 5932, pp. 1306–1309.
53. Bindi L., Steinhart P. J., Yao N., Lu P. J. Icosahedrite, Al₆₃Cu₂₄Fe₁₃, the first natural quasicrystal. American Mineralogist, 2011, V. 96, pp. 928–931.
54. Boldyrev A. K. Die von Fedorov Institut angenommene kristallographische Nomenklatur. Zeitschrift für Kristallographie, 1925, Bd. 62, pp. 145–150.
55. Boldyrev A. K. Are there 47 or 48 simple forms possible on crystals? American Mineralogist, 1936, V. 21, No. 11, pp. 731–734.
56. Bombicci L. Sulle superficie elicoidi e paraboloidi nei romboedri detti selliformi di dolomite e di altri carbonate anidri. Bologna: Tip. Gamberini e Parmeggiani, 1885, 15 p.
57. Breithaupt A. Die Paragenesis der Mineralien, mineralogisch, geognostisch und chemisch beleuchtet mit besonderer Rücksicht auf Bergbau. Freiberg: Verlag von J. G. Engelhardt, 1849, 277 p.
58. Burckhardt J. J. Der Briefwechsel von E. S. von Fedorow und A. Schoenflies, 1889–1908. Archive vor History of Exact Sciences, 1971, V. 7, No. 2, pp. 91–141.
59. Engel P. On two special classes of parallelohedra in E6. Acta Crystallographica, 2019, A75, pp. 574–583.
60. Naumann C. F. Elemente der Mineralogie. Leipzig: Verlag von W. Engelmann, 1907, 821 pp.
61. Pimonov V. V., Konevtsova O. V., Rochal S. B. Anomalous small viral shells and simplest polyhedra with icosahedral symmetry: the rhombic triacontahedron case. Acta Crystallographica, 2019, A75, pp. 135–141.
62. Rogers A. F. A tabulation of crystal forms and discussion on form names. American Mineralogist, 1935, V. 20, No. 12, pp. 838–851.
63. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J. W. Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. Physical Review Letters, 1984, V. 53, N 20, pp. 1951–1953.
64. Stroh A. H. Emanuel Swedenborg as a scientist. Stockholm: Aftonbladets Tryckeri, 1908, 112 p.
65. Tolkowsky M. Diamond design. A study of the reflection and refraction of light in a diamond. London—New York: Spon & Chamberlain, 1919, 104 p.
66. Vervoort L. Der Diamant, seine Eigenschaften und seine Bearbeitung. Antwerpen: Druckerei «Phenix», 1910, 52 p.

Received / Поступила в редакцию 31.05.2022



Граница живетского и франского ярусов девона

(Научно-производственное совещание)

Devonian Givetian-Frasnian Boundary

(Research and production meeting)

June 3, 2022, a scientific and production meeting on the topic: «Devonian Givetian-Frasnian boundary in the European North-East of Russia» was held at the Institute of Geology named after Academician N. P. Yushkin FRC Komi SC UB RAS (Syktyvkar). This meeting was initiated by Ukhta geologists and was a continuation of the production meeting of the TP NIC (05.05.2022, Ukhta).

3 июня 2022 года в Институте геологии им. академика Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар) было проведено научно-производственное совещание «Граница живетского и франского ярусов девона на Европейском Северо-Востоке России», которое было инициировано ухтинскими геологами и явилось продолжением производственного совещания ТП НИЦ (05.05.2022 г., Ухта).

Актуальность темы обусловлена продолжающейся более 20 лет дискуссией о положении нижней границы франского яруса (соответственно границы среднего и верхнего девона) на территории Восточно-Европейской платформы. Поэтому целью совещания являлось привлечение всех заинтересованных специалистов как в научной, так и в производственной сфере деятельности к решению спорной проблемы. Для достижения поставленной цели оказался удобным смешанный формат совещания: доклады можно было прослушать непосредственно в актовом зале Института геологии, онлайн на YouTube канале ИГ, а в настоящее время и в записи (<https://www.youtube.com/watch?v=xLN10uFEiyo>). Актуальность проблемы привлекла внимание широкой научной аудитории как в России, так и за ее пределами: на 14.06.22 г. уже было отмечено 1319 просмотров совещания коллегами из 9 стран.

В совещании с докладами и в дискуссии приняли участие сотрудники научных и производственных организаций (ИГ ФИЦ КНЦ УрО РАН, ВСЕГЕИ, СПбГУ, ООО «ТП НИЦ», ИГ УФИЦ РАН, МГУ, ИГТ УрО РАН), в т. ч. шесть членов бюро Девонской комиссии МСК России и пять членов Международной стратиграфической комиссии по девону.

И. О. Евдокимова (председатель девонской комиссии МСК России, член Международной стратиграфической комиссии по девону, старший научный сотрудник ВСЕГЕИ) сделала доклад «О проблеме границы среднего и верхнего девона на Восточно-Европейской платформе». Детально было рассказано об истории проблемы и ее современном состоянии.

В настоящее время эта актуальная тема разрабатывается в рамках проекта «Граница живетского и франского ярусов девона на Европейском Северо-Востоке России», получившего финансовую поддерж-

ку РФФИ (грант № 20-05-00445 А). Проект выполняется научными сотрудниками ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ВСЕГЕИ, СПбГУ, в последнее время к исследованиям привлечены палеонтологи и литологи ИГ УФИЦ РАН, ИГТ УрО РАН. Руководитель проекта в. н. с. лаб. стратиграфии ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН О. П. Тельнова сделала сообщение о результатах исследований в 2020–2022 гг. и перспективах решения проблемы границы среднего и верхнего девона на Европейском Северо-Востоке России. Граница среднего и верхнего девона — это наиболее спорный рубеж в девоне, требующий нового методологического подхода с привлечением современного инструментария, что было продемонстрировано на примере палинологического метода. Для биостратиграфического расчленения континентальных и прибрежно-морских отложений основным инструментарием остается палинологический метод. Однако описанная последовательность палинокомплексов только фрагментарно скоррелирована с зонами по конодонтам (ортостратиграфической группе в девоне). Дальнейшие работы по биоэкологической корреляции — одно из возможных решений обсуждаемой проблемы.

В соответствии с планом проекта проведены экспедиционные полевые работы на естественных обнажениях пограничного интервала в Тимано-Североуральском регионе, где этот стратиграфический интервал представлен в разнофациальных разрезах с наиболее полной стратиграфической последовательностью (в 2020 г. в южной части гряды Чернышева, бассейн р. Изъяель; в 2021 г. на Южном Тимане, на стратотипах тиманской и устьярегской свит). О результатах экспедиционных полевых и лабораторных исследований, проведенных в 2021 году на Среднем Тимане, рассказали научные сотрудники ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН И. Х. Шумилов «Геологическое строение бассейна р. Цильмы, Средний Тиман» и П. А. Безносков «Сообщества позвоночных из пограничных средневерхнедевонских отложений бассейна р. Цильмы».

В ходе обсуждений докладов участники совещания пришли к следующим выводам:

— необходима координация исследований, проводимых в научных и производственных организациях, с привлечением керна скважин, пробуренных в последние годы не только на территории ТПП, но и в сопредельных регионах. Результаты таких комплексных исследований представлены в статье О. В. Артюшковой, О. П. Тельновой, Л. И. Мизенс, А. Г. Мизенс «Первая находка *Skeletognathus norrisi* в ассоциации со спорами высших растений и брахиоподами в пограничных живетско-франских отложениях, вскрытых скважиной № 8 Царичанская (Восточно-Оренбургское сводовое поднятие, Русская



а) Координатор совещания: ведущий научный сотрудник ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар), д. г.-м. н. О. П. Тельнова; б) Слушатели совещания в зале ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН; в) Главный научный сотрудник ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа), д. г.-м. н. О. В. Артюшкова; д) Председатель Межведомственного стратиграфического комитета по девону России: И. О. Евдокимова, ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург); е) Коллектив геологов ТП НИЦ (г. Ухта)

a) Meeting Supervisor: Leading Researcher at the Institute of geology FRC Komi SC UB RAS (Syktyvkar), D. Sc. (Geology and Mineralogy) O. P. Telnova; b) Participants of the meeting in the hall of the Institute of geology FRC Komi SC UB RAS; c) Chief Researcher at the Institute of geology UFRC RAS (Ufa), D. Sc. (Geology and Mineralogy) O. V. Artyushkova; d) Chairman of the Interdepartmental Stratigraphic Committee for the Devonian of Russia: I. O. Evdokimova, VSEGEI (St. Petersburg); e) Team of geologists from TP SRC (Ukhta)

платформа)». Рукопись принята к публикации в журнале «Литосфера»;

— необходимо доизучение стратотипа саргаевского горизонта, который используется в региональных стратиграфических схемах, его стратиграфический объем до сих пор остается спорным (запланированы экспедиционные полевые исследования в 2023 г. на Среднем Урале).

Решение по обоснованию современного уровня границы будет способствовать совершенствованию региональных стратиграфических схем как основы для всех видов региональных геологических работ, включая прогноз, поиски и разведку месторождений полезных ископаемых.

**Координатор совещания
д. г.-м. н. О. П. Тельнова**

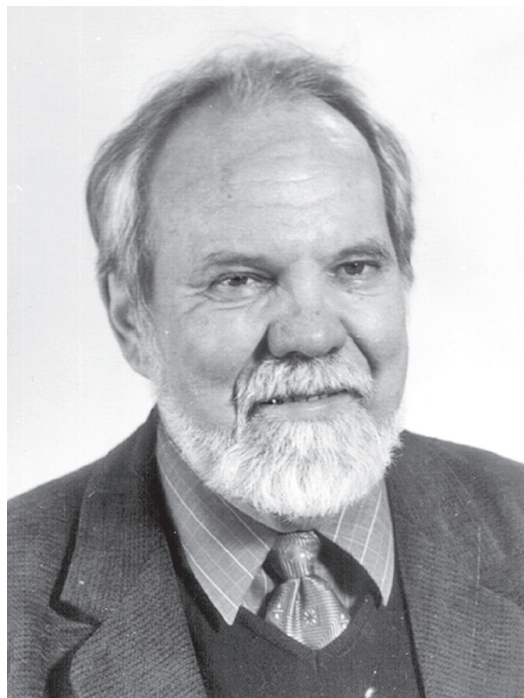


Настоящий геолог, талантливый преподаватель, замечательный человек

(к 90-летию со дня рождения Льва Васильевича Махлаева)

A real geologist, a talented teacher, a wonderful person

(Celebrating the 90th anniversary of the birth of Lev Vasilievich Makhlaev)



4 июня 2022 года исполнилось 90 лет со дня рождения Льва Васильевича Махлаева, главного научного сотрудника Института геологии Коми НЦ УрО РАН, доктора геолого-минералогических наук, профессора, члена ученого совета института и специализированного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций, заслуженного работника Республики Коми.

Лев Васильевич родился 4 июня 1932 г. в г. Грязовце Вологодской области. В 1950 г. с золотой медалью закончил среднюю школу в Смоленске и поступил на геологический факультет ЛГУ, который с отличием окончил в 1955 г. по специальности «геология и поиски месторождений радиоактивных элементов».

В 1956–1962 гг. работал инженером-геологом в Институте геологии Арктики в Ленинграде, занимался геолого-съёмочными, поисковыми и тематическими работами. С 1962 по 1969 г. был научным сотрудником Красноярского отделения СНИИГТиМС, проводил исследования по проблемам метаморфизма, ультраметаморфизма и гранитообразования в докембрийских комплексах Енисейского кряжа и Таймыра. С 1969 по 1974 г. в этом же институте руководил созданным по

June 4, 2022 marks the 90th anniversary of the birth of Lev Vasilyevich Makhlaev, Chief Researcher of the Institute of Geology of the Komi SC UB RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Member of the Institute Scientific Council and the Specialized Council for the Defense of Doctoral and Candidate Theses, Honored Worker of the Komi Republic.

его инициативе сектором геологии и металлогении Таймыра. В 1974 г. в Красноярском институте цветных металлов организовал кафедру общей геологии, минералогии и петрографии, которой заведовал одиннадцать лет. На севере Красноярского края им была установлена новая кимберлитовая провинция и новый тип титанистых пород: ильменитсодержащих парасланцев — источников ильменита прибрежно-морских россыпей.

В 1964 г. в Новосибирском институте геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР защитил кандидатскую диссертацию «Метаморфические породы и гранитоиды берега Харитона Лаптева (Таймыр)». В 1968 г. сформулировал понятие об изолитогенных гранитных рядах — продуктах многоступенчатого гранитообразования.

В 1980 г. защитил докторскую диссертацию «Гранитная серия докембрия Таймыра и проблема палеолитологических реконструкций ультраметаморфических комплексов». В 1982 г. получил ученое звание профессора.



Кафедра общей геологии, петрографии и минералогии. Институт цветных металлов, Красноярск, 1974–1983 гг.

Department of General Geology, Petrography and Mineralogy. Institute of Non-Ferrous Metals, Krasnoyarsk, 1974–1983



С сотрудниками лаборатории петрографии ИГ Коми НЦ УрО РАН, 1998 г.

With the staff of the Laboratory of Petrography of the Institute of geology Komi SC UB RAS, 1998

С 1985 г. Л. В. Махлаев приступил к работе в Институте геологии Коми филиала АН СССР на должности старшего научного сотрудника и в том же году был избран заведующим лабораторией петрографии и рудных полезных ископаемых. С 2003 г. стал главным научным сотрудником той же лаборатории. Область научных интересов — геология докембрия, геология и петрология гранитов, метаморфизм.

Занимаясь изучением гранитоидов севера Урала, Л. В. Махлаев обосновал применимость к ним современной палеосубстратной классификации, впервые установил и охарактеризовал в этом регионе граниты А-, I- и М-типов. Совместно с И. И. Голубевой заложил основы нового научного направления в петрографии, объектом изучения которого являются выделенные ими специфические образования — магматогенные флюидизиты, внедрявшиеся не в виде расплавов, а в форме твердогазовых или расплавно-твердогазовых взвесей. Было доказано широкое распространение флюидизитов не только на Урале, но и в других регионах мира, а также предложено рассматривать флюидизиты в качестве особого таксона (подтипа) в схеме классификации горных пород. Л. В. Махлаев и И. И. Голубева обосновали принадлежность щелочно-ультраосновных дайковых пород Среднего Тимана к лампрофирам керсантит-минеттового ряда, в связи с чем были пересмотрены перспективы их алмазоносности.

Л. В. Махлаевым лично и в соавторстве опубликовано более ста двадцати научных работ по геологии до-

кембрия и гранитоидам Восточной Сибири и Таймыра, магматитам севера Урала, кимберлитам и родственными им породам Маймеча-Котуйской провинции и Тиманского региона. Из двенадцати монографий и учебных пособий важнейшими являются: «Генетические гранитоидные ряды докембрия Таймыра» (Красноярск: Красноярское кн. изд-во, 1972. 158 с.), «Изолиитогенные гранитные ряды» (Новосибирск: Наука, 1987. 158 с.), «Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия: Полярный и Приполярный Урал» (Екатеринбург: Наука, Уральское отделение, 1996. 150 с.), «Конгломераты и магматогенные псевдоконгломераты» (Екатеринбург: Наука, Уральское отделение, 2005. 180 с.), «Гранитогенез: основные проблемы, противоречия, тенденции. Учебное пособие для студентов и аспирантов» (Сыктывкар: Изд-во СыктГУ, 1998. 36 с.), «Введение в геологию. Учебное пособие по общей геологии. Ч. I» (Сыктывкар: Изд-во СыктГУ, 1998. 68 с.), «Динамическая геология. Учебное пособие по общей геологии. Ч. II» (Сыктывкар: Изд-во СыктГУ, 1999. 84 с.), «Метаморфизм горных пород. Учебное пособие для студентов геологических специальностей» (Сыктывкар: Изд-во СыктГУ, 2006. 120 с.).

Лев Васильевич Махлаев являлся членом Межведомственного петрографического комитета РАН, а также Уральского и Коми региональных петрографических советов. В 2000 г. был избран действительным членом Академии естественных наук России и Уральской академии геологических наук.

Л. В. Махлаев награжден медалью «250-летие Ленинграда» (1960), знаком «Победитель социалистического соревнования СССР» (1979), почетными грамотами Министерства геологии РСФСР (1983), Совета министров Республики Коми (1992), почетными грамотами РАН и профсоюза работников РАН (2008). В 2000 г. ему было присвоено звание «Заслуженный работник Республики Коми», в 2012 г. он был награжден медалью «Геолог Игорь Грамберг», в том же году получил звание «Почетный деятель науки Республики Коми».

Л. В. Махлаеву посвящены статьи в «Энциклопедии Республики Коми» (Т. 2. Сыктывкар, 1999), в справочниках «Кто есть кто в Республике Коми» (Сыктывкар, 1994), «Геологи и горные инженеры России (1700—2000). Персоналии» (М.: Геоинформцентр, 2002), «Кто есть кто в РАЕН» (Издание 2-е. М.: Гуманистика, 2002), а также в других справочно-биографических изданиях.

Лев Васильевич оставил незабываемый след в истории лаборатории петрографии Института геологии Коми НЦ УрО РАН и внес ощутимый вклад в развитие большой геологической науки.

**К. г.-м. н. К. В. Куликова,
В. А. Капитанова**

Редакторы издательства:

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

Компьютерная верстка

Т. В. Хазовой, А. Ю. Перетягина

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 29.07.2022. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 6,5. Тираж 140. Заказ 1186. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Адрес: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru
На обложке использованы фото А. Антошкиной, К. Повасева, И. Астаховой, А. Журавлева, Н. Воробьева