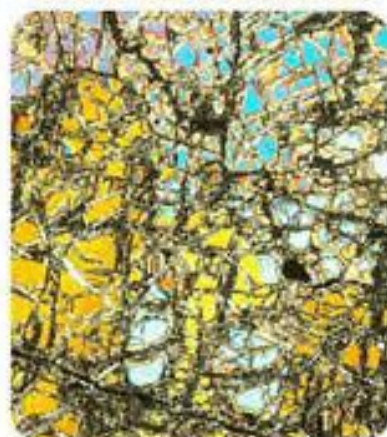




ISSN 2712-7761

№ 1 (361), январь 2025

Вестник геонаук





Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Январь
January
2025,
№ 1 (361)

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

Главный редактор А. М. Асхабов

Зам. главного редактора И. Н. Бурцев

Зам. главного редактора О. Б. Котова

Ответственный секретарь И. В. Козырева

Chief Editor A. M. Askhabov

Deputy Chief Editor I. N. Burtsev

Deputy Chief Editor O. B. Kotova

Executive Secretary I. V. Kozyreva

Редакционный совет

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

Технический редактор Г. Н. Каблис

Заведующий редакцией Т. А. Некучаева

Editorial Board

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

Technical Editor G. N. Kablis

Managing Editor T. A. Nekuchaeva

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2023) – 0.540



geo.komisc.ru/vestnik

SCIENTIFIC JOURNAL

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

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Two-year RSCI
impact factor (2023) – 0.540

Содержание**Content****Научные статьи****Scientific articles**

Вступая в 2025 год <i>А. М. Асхабов</i> 3	Heading into 2025 <i>A. M. Askhabov</i> 3
Типоморфизм золота в метасоматитах золотосульфидного месторождения (Средний Урал) <i>А. В. Чумаков, О. В. Аликин, В. Н. Рудашевский, С. А. Удинцова, Е. Г. Панова, П. Н. Лейбгам</i> 4	Gold typomorphism in metasomatites of gold-sulfide deposit (Middle Urals, Trans-Ural megazone) <i>A. V. Chumakov, O. V. Alikin, V. N. Rudashevsky, S. A. Udintsova, E. G. Panova, P. N. Leibham</i> 4
Петрофизическое группирование сланцевых пород неркаюского комплекса (Приполярный Урал) <i>Т. А. Пономарева, Е. В. Кушманова</i> 14	Petrophysical grouping of schist rocks of the Nerkayu complex (the Nether-Polar Urals) <i>T. A. Ponomareva, E. V. Kushmanova</i> 14
Обзор подводных курильщиков Срединно-Атлантического хребта <i>И. Г. Добрецова</i> 25	Review of underwater smokers on the Mid-Atlantic Ridge <i>I. G. Dobretsova</i> 25
Выявление геохимических маркеров ореольной проекции глубокозалегающих рудных тел по результатам опробования снежного покрова (на примере Турунтаевского полиметаллического месторождения) <i>М. П. Тентюков, И. С. Соболев, Д. В. Камашев, Г. В. Игнатьев, Р. И. Шайбеков, В. И. Михайлов, Е. Г. Язиков, Р. Ю. Гаврилов, В. С. Бучельников</i> 34	Identification of geochemical markers of the halo projection of deep-seated ore bodies based on the results of sampling the snow cover (using the example of the Turuntaevsky polymetallic deposit) <i>M. P. Tentyukov, I. S. Sobolev, D. V. Kamashev, G. V. Ignatiev, R. I. Shaibekov, V. I. Mikhailov, E. G. Yazikov, R. Yu. Gavrilov, V. S. Buchelnikov</i> 34
Из опыта преподавания. XVI. Минеральные ассоциации: смежность, парагенезис, парастерезис. К 260-летию со дня рождения В. М. Севергина <i>Ю. Л. Войтеховский</i> 47	From teaching experience. XVI. Mineral associations: contiguity, paragenesis, parasteresis. Celebrating the 260 th anniversary of the birth of V. M. Severgin <i>Yu. L. Voytekhovsky</i> 47

Хроника, события, факты**Chronicle, events, facts**

Новые издания 56	New publications 56
План научных мероприятий в ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на 2025 год..... 56	Plan of scientific events in the Institute of geology FRC Komi SC UB RAS in 2025 56

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting

geo.komisc.ru/vestnik/authors



Вступая в 2025 год: Ориентир года – «Белый список» научных изданий

Наступивший 2025 год будет знаменательным для нашего журнала, ему исполняется 30 лет. За эти годы «Вестник геонаук» прошел славный путь от информационного издания, преимущественно ориентированного на внутриинститутскую жизнь, до авторитетного академического научного журнала, занимающего достойное место среди отечественных журналов. С 2010 года «Вестник геонаук» (прежнее название «Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН») находится в ВАКовском списке, на данный момент по 9 специальностям.

В 2024 году «Вестник геонаук» включен в RSCI (Russian Science Citation Index). Напомню, что проект RSCI – это престижная база цитирования, совместный проект Clarivate Analytics (разработчик Web of Science) и научной электронной библиотеки (разработчик Elibrary.ru и РИНЦ). Для журнала это, несомненно, большой успех. Наш ориентир этого года – вхождение в «Белый список» Минобрнауки. Последнее становится особенно актуальным в связи с произошедшей заменой международных наукометрических показателей (Web of Science и Scopus) на отечественный рейтинг научных изданий, что важно при расчетах комплексного балла публикационной результативности (КБПР). Статьи в журналах из «Белого списка» будут иметь существенно повышенный вес.

Приятная новость этого года – статья А. В. Лютикова («Вестник геонаук», 2024, № 3) признана лучшей в Карельском научном центре РАН в номинации «Для молодых учёных в возрасте до 30 лет включительно» по направлению исследований «Науки о Земле».

Мы готовы и далее работать над повышением рейтинга журнала и совершенствованием редакционной работы.

От имени редакционного коллектива поздравляю всех с Новым годом! Пусть этот год принесет много счастья, новых открытий и радостных событий! Желаю всем здоровья, удачи, исполнения желаний! И конечно, первоклассных статей в наш журнал!

Главный редактор журнала «Вестник геонаук»
академик А. М. Асхабов

Heading into 2025: The landmark of the year – «White List» of scientific editions

The coming year 2025 will be significant for our journal, it turns 30. Over these years, «Vestnik of Geosciences» has come a long way from an information publication, mainly focused on the intra-institute life, to an authoritative academic scientific journal, occupying a worthy place among Russian journals. Since 2010, «Vestnik of Geosciences» (formerly «Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences») has been on the list of the Higher Attestation Commission, currently for 9 specialties.

In 2024, Vestnik of Geosciences was included in the RSCI (Russian Science Citation Index). Let me remind that the RSCI project is a prestigious citation database, a joint project of Clarivate Analytics (Web of Science developer) and the scientific electronic library (Elibrary.ru and RSCI developer). This is undoubtedly a great success for the journal. Our target for this year is to be included in the White List of the Ministry of Education and Science. The latter is becoming especially relevant in connection with the replacement of international scientometric indicators (Web of Science and Scopus) with a domestic rating of scientific publications, which is important when calculating the Comprehensive Publication Performance Score (CPPS). Articles from the White List journals have a significantly increased significance.

Good news this year: the article by A. V. Lyutikov (Vestnik of Geosciences, 2024, No. 3) was recognized as the best at the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences in the nomination «For young researchers aged up to 30 inclusive» in the Earth Sciences research trend.

We are ready to continue working to increase the rating of the journal by improving editorial work.

On behalf of the editorial team, I congratulate everyone on the New Year! May this year bring much happiness, new discoveries and joyful events! I wish everyone health, good luck, fulfillment of wishes! And of course, first-class articles for our journal!

Chief Editor of «Vestnik of Geosciences»
Academician A. M. Askhabov

Типоморфизм золота в метасоматитах золотосульфидного месторождения (Средний Урал)

А. В. Чумаков^{1,2}, О. В. Аликин², В. Н. Рудашевский², С. А. Удинцова²,
Е. Г. Панова¹, П. Н. Лейбгам³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; *tchumakov.a.v@yandex.ru*

² ООО «ЦНТ Инструментс», Санкт-Петербург, Россия; *o.v.alikin@yandex.ru*

³ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, Москва, Россия; *leib-na@yandex.ru*

Выявлены типоморфные особенности золота золотосульфидного месторождения (Средний Урал). Состав минералов определен с использованием микрорентгеноспектрального анализа. Крупные свободные частицы встречаются в виде серебристого золота (до 7.01 мас. % Ag). При изучении включений золота в сульфидах отмечено две разновидности по химическому составу: ртутное золото (до 2.87 мас. % Hg) и серебристое (до 6.28 мас. % Ag). В виде включения в пирите отмечена редкая находка теллурида золота – калаверита, средний химический состав которого (мас. %): Au = 45.20 ± 1.33 , Te = 54.18 ± 1.38 . Определены формы нахождения золота, его элементов-спутников (Ag, Hg, As, Cu, Pb и др.) и минералов-носителей (серебристое, ртутное золото, калаверит). Технология минералогических исследований с использованием электроимпульсной дезинтеграции позволила избежать переизмельчения исследуемых проб и выделить минеральные, микроминеральные формы золота и его спутников с помощью метода гидросепарации.

Ключевые слова: золото, электроимпульсная дезинтеграция, гидросепарация, типоморфизм минералов золота, элементы-спутники золота

Gold typomorphism in metasomatites of gold-sulfide deposit (Middle Urals, Trans-Ural megazone)

A. V. Chumakov^{1,2}, O. V. Alikin², V. N. Rudashevsky², S. A. Udintsova²,
E. G. Panova¹, P. N. Leibham³

¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² CNT Instruments, St. Petersburg, Russia

³ Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia

Typomorphic features of gold of gold-sulfide deposit (Middle Urals) are revealed. Mineral compositions were determined using micro-X-ray spectral analysis. The studied coarse free particles occurs in the form of silver gold (up to 7.01 wt. % Ag). When studying gold inclusions in sulfides, 2 varieties by chemical composition of gold inclusions were noted: mercury gold (up to 2.87 wt. % Hg) and silver gold (up to 6.28 wt. % Ag). A rare find of gold telluride, calaverite, was noted as an inclusion in pyrite, the average chemical composition of which (wt. %) is: Au = 45.20 ± 1.33 , Te = 54.18 ± 1.38 . The forms of gold, its companion elements and carrier minerals have been determined. The technology of mineralogical research with the use of electric pulse disaggregation allowed to avoid overgrinding of the studied samples and to identify mineral, micromineral forms of gold and its satellites by means of hydroseparation method.

Keywords: gold, electric pulse disaggregation, hydroseparation, typomorphism of gold minerals, gold indicator elements

Введение

Золото относится к стратегическим полезным ископаемым, добыча которых необходима для пополнения запасов минерально-сырьевой базы (МСБ) страны. Российская Федерация обладает большими запасами золота: обеспеченность действующих добывающих предприятий балансовыми запасами собственно золоторудных месторождений составляет около 18 лет, комплексных — менее 33 лет, а россыпных — 6 лет (Государственный..., 2022). Для эффективного освоения этих запасов применяются передовые методы обогащения и извлечения: гравитационное и флотационное обогащение минералов золота, амальгамирование, цианирование золотосо-

державших руд и концентратов, высокотемпературный хлорирующий обжиг с возгонкой золота в газовую фазу, автоклавное окисление золотосодержащих сульфидов, бактериальное выщелачивание и другие передовые методы (Гудков и др., 2004, 2010; Кучерский, 2007; Travis, 2011; Ernawati et al., 2018). Совершенствование технологий позволяет добиваться максимальной степени извлечения металла и сокращения процессов обогащения.

Для дальнейшего развития горнодобывающей отрасли необходимо постоянно пополнять МСБ золота за счет не только доразведки уникальных крупных месторождений, но и вовлечения относительно мелких объектов, которые можно рассматривать как допол-

Для цитирования: Чумаков А. В., Аликин О. В., Рудашевский В. Н., Удинцова С. А., Панова Е. Г., Лейбгам П. Н. Типоморфизм золота в метасоматитах золотосульфидного месторождения (Средний Урал) // Вестник геонаук. 2025. 1(361). С. 4–13. DOI: 10.19110/geov.2025.1.1

For citation: Chumakov A. V., Alikin O. V., Rudashevsky V. N., Udintsova S. A., Panova E. G., Leibham P. N. Gold typomorphism in metasomatites of gold-sulfide deposit (Middle Urals, Trans-Ural megazone). Vestnik of Geosciences, 2025, 1(361), pp. 4–13, doi: 10.19110/geov.2025.1.1



нительные источники этого металла. Одно из таких месторождений золотосульфидного типа находится на Среднем Урале, в 26 км к югу от г. Артемовского Свердловской области. С геологической точки зрения месторождение расположено близ Алапаевско-Челябинского разлома (Казаков и др., 2017). Оно сформировано в субмеридиональной полосе сланцев серицит-хлоритового состава (белоярская толща) и локализовано на контакте кварцевых диоритов (C_1) и габбро (C_1) с андезито-базальтовыми порфиридами и туфами (D_3). Среди сланцев встречаются линзы серпентинитов, габброидов и тектонизированных риолитов. Рудные тела представлены наиболее продуктивными золотоносными кварцевыми линзами и прилегающими минерализованными зонами во вмещающих породах (Серавкин, 2009). На исследуемом месторождении утверждены балансовые запасы золота по категориям $C_1 + C_2$ в количестве 2.275 т (Казаков и др., 2017).

Работами предшественников (Сазонов и др., 2001) установлено, что золото встречается совместно с главными минералами рудных тел: кварцем, карбонатами и сульфидами. Наиболее часто золото отмечено в ассоциациях с пиритом, халькопиритом, сфалеритом и теллуридами. Размеры золота очень сильно варьируют: от сотых долей до целых миллиметров. Средняя пробность золота на месторождении — 927.1, из элементов-примесей отмечено исключительно серебро.

Целью работы являлось определение содержаний золота в метасоматитах месторождения, определение форм его нахождения, выявление элементов-спутников и сопутствующих минералов золота.

Материалы и методы исследований

Материал для исследования представлен комбинированной технологической пробой (500 кг), приготовленной из керна минерализованных метасоматитов. Для петрографических исследований также отобраны характерные образцы керна, которые оптически исследовались в виде шлифов и аншлифов на микроскопе Olympus BX51 с камерой Leica DC 300 и программным пакетом Autorano Giga. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) проводилась на растровом электронном микроскопе-микроанализаторе TM 3000 HITACHI и сканирующем электронном микроскопе JSM-6390 с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (аналитик А. В. Антонов).

Для оценки количественного минерального состава выполнялся рентгенофазовый анализ (РФА) пробы на рентгеновском порошковом дифрактометре D2 Phaser (Bruker) в диапазоне углов 2θ от 5° до 90° . Обработка дифрактограммы осуществлялась в программе DIFFRAC.EVA, TOPAZ.

Содержание золота определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) после пробирной плавки. Общее и сульфидное содержание серы в исследуемой пробе измерялось методом газового анализа в лаборатории ALS Group (Москва). Для анализа распределения микроэлементов использовался метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Aurora M90, ЕНИ ПГНИУ, г. Пермь, аналитик А. Ю. Пузик) после разложения пробы в царской водке.

Для определения форм нахождения золота и его спутников, их размерных характеристик из технологической пробы отобрана представительная навеска 20 кг. Пробоотбор проводился квартованием методом усеченного конуса после предварительного крупноконусового дробления части исходной пробы на щековой дробилке PEX250x750 до P100 – 60 мм и усреднения. Во избежание переизмельчения и заражения дробление пробы для минералогических исследований по 3D-технологии (Рудашевский и др., 2018) осуществлялось методом электроимпульсной дезинтеграции (ЭИД) на установке EPD Spark-2 (Рудашевский и др., 1991). ЭИД позволяет разрушать горные породы по границам зерен и кристаллов в минеральных агрегатах, минимизируя их переизмельчение (Юткин, 1986; Рудашевский и др., 1991; Зорин, 2022). Такой подход обеспечивает более точное и достоверное определение типоморфных характеристик золота и сопутствующих минералов (Рудашевский и др., 2018).

Продукты ЭИД расситованы мокрым способом на 10 фракций (мм): +5, –5 + 2.5, –2.5 + 1.0, –1.0 + 0.5, –0.5 + 0.315, –0.315 + 0.2, –0.2 + 0.125, –0.125 + 0.071, –0.071 + 0.045, –0.045. Далее из фракции –0.045 мм отделялся класс крупности –0.010 мм методом ультразвуковой седиментации (Личманова, 1972) в фарфоровых чашках с круглым днищем (Сапфир-2.8 ТТЦ, 2.8 л). Для определения содержаний золота и сопутствующих микроэлементов из 11 классов крупности отбиралась аналитическая навеска для атомно-абсорбционной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Крупные фракции (–5.0 + 0.5 мм) изучались в аншлифах, а для концентрирования рудных минералов более тонких классов (–0.5 + 0.045 мм) использовалась технология разделения твердых частиц по плотности — метод гидросепарации (Гидросепаратор HS-11 и HS-технология) (Патент..., 2006; Lastra et al., 2005; Rudashevsky et al., 2001). Метод гидросепарации обеспечивает разделение материалов с различной плотностью за счет конкуренции масс частиц, захваченных восходящим слабым ламинарным водным потоком, — тяжелые частицы оседают на дно разделительной трубки, тогда как легкие фракции удаляются из нее. Применение гидросепарации для обогащения измельченных материалов позволяет получить «тяжелый» концентрат (HS-концентрат), который предоставляет статистически достоверную минералогическую информацию о пробе в пределах крупности слагающих ее частиц в диапазоне от <0.01 до 0.5 мм. Полученные концентраты представляют репрезентативные выборки зёрен рудных минералов в пределах узких классов крупности, из которых изготавливаются однослойные полированные шлифы для различных методов локального минералогического приборного анализа.

Результаты исследований

Золото и элементы-примеси

Петрографические исследования и результаты рентгенофазового анализа показали, что метасоматиты состоят (отн. %): из кварца (38.0), хлорита (24.0), альбита (19.4), кальцита (5.7), доломита (7.0) и серицита (5.9), что позволяет называть эти породы березитоподобными метасоматитами. В метасоматитах присутствуют сульфиды (первые %), которые представле-

ны главным образом пиритом. Кроме пирита в небольших количествах присутствуют зерна халькопирита, сфалерита и галенита. Встречаются индивиды самородного золота. Сульфидные минералы образуют текстуры от редко- до густовкрапленных и гнездообразных, а также полосчатые до массивных. Мелкозернистый молочно-белый кварц частично перекристаллизован (рис. 1).

Метасоматиты серицит-карбонат-альбит-хлорит-кварцевого состава характеризуются высокими содержаниями SiO_2 (51.1–58.4 мас. %) и K_2O (1.09–1.44 мас. %) относительно вмещающих пород белоярской толщи (48.77 и 0.2 мас. % соответственно). Содержания Na_2O , наоборот, минимальны в метасоматически измененных породах по сравнению с породами вмещающей рамы (2.11 и 4.61 мас. % соответственно).

Определены содержания золота и его элементов-спутников по классам крупности исследуемой пробы

(рис. 2, табл. 1). Среднее содержание золота составляет 1.9 г/т. Среднее содержание сульфидной серы в породах варьируется в пределах 0.5–1.5 мас. %. Содержание микроэлементов изменяется в пределах (г/т): Ag — 0.1–0.4, As — 6–14, Bi — 0.2–0.6, Te — 0.16–0.24, Hg — 0.17–0.38, Co — 27–49, Ni — 98–184, Cu — 70–170, Pb — 5–20, Zn — 74–124, Sb — 0.6–1.2.

Наблюдается неравномерное распределение золота по классам крупности, что обусловлено различной морфологией благородного металла в метасоматитах. Значительные содержания золота отмечены в классах (мм): $-0.315 + 0.2$ и $-0.045 + 0.010 = 2.21$ г/т и 2.00 г/т соответственно. Самые низкие содержания отмечены в классе $+5$ мм и -0.010 мм: в первом случае они обусловлены недостаточным вскрытием матрицы метасоматитов, а во втором, вероятно, природным размерным распределением сульфидов, с которыми связано золото крупностью более чем -0.010 мм.

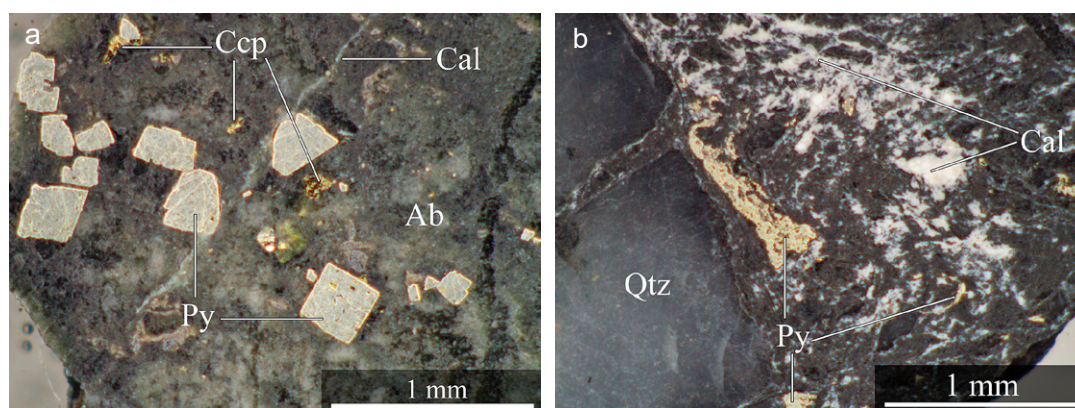


Рис. 1. Березитоподобные метасоматиты месторождения: а — вкрапленная минерализация (пирит), б — минерализация, связанная с кварц-карбонатными прожилками. Py — пирит, Ccp — халькопирит, Cal — кальцит, Ab — альбит, Qtz — кварц

Fig. 1. Characteristic samples of beresites from the deposit: а — disseminated mineralization (pyrite), б — mineralization associated with quartz-carbonate veins. Py — pyrite, Ccp — chalcopyrite, Cal — calcite, Ab — albite, Qtz — quartz

Таблица 1. Распределение элементов-спутников золота по классам крупности, г/т

Table 1. Grain size distribution of gold and coexisting elements, ppm

Элемент Element	Класс круп- ности, мм Size, mm	+5	-5+2.5	-2.5+1.0	-1.0+0.5	-0.5+0.315	-0.315+0.2	-0.2+0.125	-0.125+0.071	-0.071+0.045	-0.045+0.010	-0.010
Ag		0.10	0.14	0.18	0.17	0.24	0.27	0.38	0.25	0.39	0.40	0.21
As		7	10	6	9	8	9	14	9	9	8	4
Bi		0.25	0.44	0.23	0.31	0.38	0.23	0.48	0.59	0.55	0.47	0.31
Co		32	28	28	27	35	44	48	49	38	36	33
Cu		111	84	77	82	90	95	98	116	130	170	90
Hg		0.18	0.20	0.17	0.25	0.19	0.26	0.29	0.36	0.33	0.38	0.30
Ni		116	102	106	98	113	128	137	140	138	134	170
Pb		7	7	8	5	7	6	8	8	7	11	18
Sb		0.6	0.6	0.7	0.6	0.8	0.7	1.0	1.2	1.6	1.4	0.6
Te		0.18	0.16	0.21	0.17	0.19	0.20	0.22	0.19	0.23	0.22	0.24
Zn		79	75	77	74	76	81	80	87	83	92	121

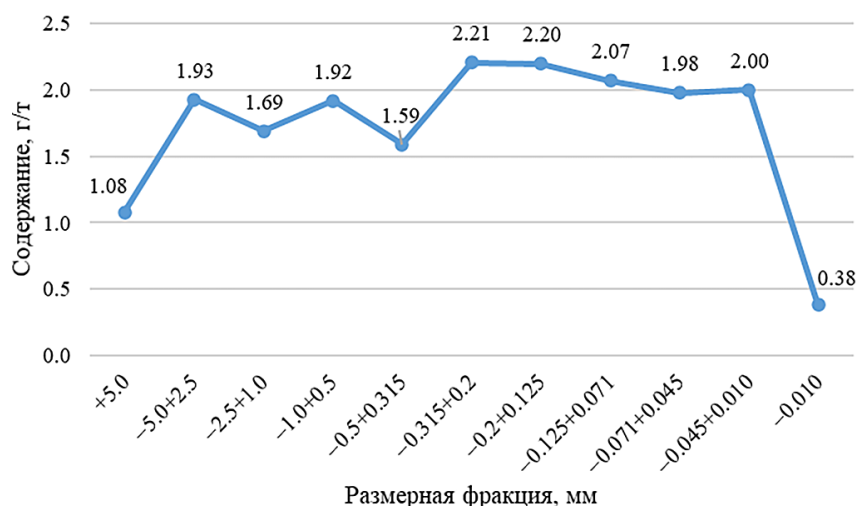


Рис. 2. Распределение содержаний золота по классам крупности

Fig. 2. Gold grain size distribution

Морфология золота в метасоматитах месторождения

Морфологические характеристики частиц золота являются ключевыми для понимания их распределения и нахождения в пределах изучаемого месторождения. В березитоподобных метасоматитах золото отмечено в различных формах, включая свободные частицы, и золото, связанное с сульфидами. На рис. 3 представлены характерные морфологические типы самородного золота. Обнаруженные частицы золота имеют различный облик и относятся ко всем основным морфологическим типам — идиоморфному, неправильной формы и смешанным формам (Петровская, 1973; Николаева и др., 2023). Ниже рассмотрены морфологические особенности каждого типа: для свободного золота и связанного с сульфидами.

Свободное золото

Зерна представлены следующими типами самородного золота: таблитчатые, трещинные, комковидные, интерстициальные и гемиидиоморфные.

Таблитчатые золотины составляют большую часть рассмотренных золотин и, как правило, представляют собой изометричные или близкие к изометричным плохо образованные частицы с округленными в разной степени вершинами и ребрами размером 40–50 мкм, некоторые зерна имеют округлую форму (рис. 3, а–с).

Трещинные прожилковые обособления — вторые по встречаемости в изученной пробе, представлены удлиненными, вытянутыми индивидами с извилистыми контурами, образованными в результате заполнения золотом трещин в кварце и во вмещающей породе. Частицы золота представлены прожилковыми разновидностями и удлиненными золотинками (до 100 мкм) со сложной морфологией (рис. 3, d–f).

Комковидные золотины — частицы золота сложной формы, напоминающие комки пластичного вещества, характеризуются более плотной центральной частью, от которой в разные стороны отходят быстровыклинивающиеся ответвления или угловатые выступы (рис. 3, g–i), которые цементируют раздробленные минералы. Они достаточно характерны для золота, ассоциирующего с рудными минералами. Размер таких частиц 50–80 мкм.

Интерстициальные частицы — угловатые и уплощенные, размером 50–60 мкм, утолщенные в центре,

с короткими островыклинивающимися выступами вдоль границ зерен ассоциирующих минералов (рис. 3, j, k).

Гемиидиоморфные золотины и их сростки — трещинно-прожилковые, комковидные или интерстициальные обособления с отдельными несовершенно развитыми ограниченными выступами и ответвлениями (рис. 3, l–n). Их размеры варьируют от 20 до 60 мкм.

Золото, связанное с сульфидами

Частицы золота наблюдаются в виде включений в пирите (рис. 4), относятся к смешанному морфологическому типу золота (Николаева и др., 2023). Преимущественно встречаются мелкие округлые каплевидные обособления (характерная морфологическая разновидность для вкраплений золота в сульфидах) (рис. 4, а), также наблюдаются единичные более крупные таблитчатые изометричные частицы с округленными гранями (рис. 4, b) и ребрами и отдельное включение плохо ограненной удлиненной золотины с элементами расщепленного строения у ее окончания (рис. 4, c).

Таким образом, самородное золото в изученных березитоподобных метасоматитах имеет разнообразную морфологию: встречаются таблитчатые, трещинные, комковидные, интерстициальные и гемиидиоморфные формы, а среди золота, связанного с сульфидами, преимущественно встречаются мелкие округлые каплевидные частицы самородного золота. Эти данные также подчеркивают необходимость тщательного контроля гранулометрического состава на всех этапах переработки руд для обеспечения эффективной и экономически целесообразной эксплуатации месторождения.

Для оценки размерных характеристик самородного золота в соответствии с предложенной систематикой Н. В. Петровской (1973) с дополнениями Л. А. Николаевой и соавторов (2023) выполнен статистический анализ размеров частиц в микронах (рис. 5); для классификации использовался параметр ECD — equivalent circle diameter. Стоит отметить, что размеры самородного золота варьируют в большом диапазоне: от первых мкм до 200 мкм.

Анализ размеров частиц самородного золота (рис. 5) указывает на значительную его долю (80.9 %) в диапазоне размеров частиц 1–50 мкм, что по пред-

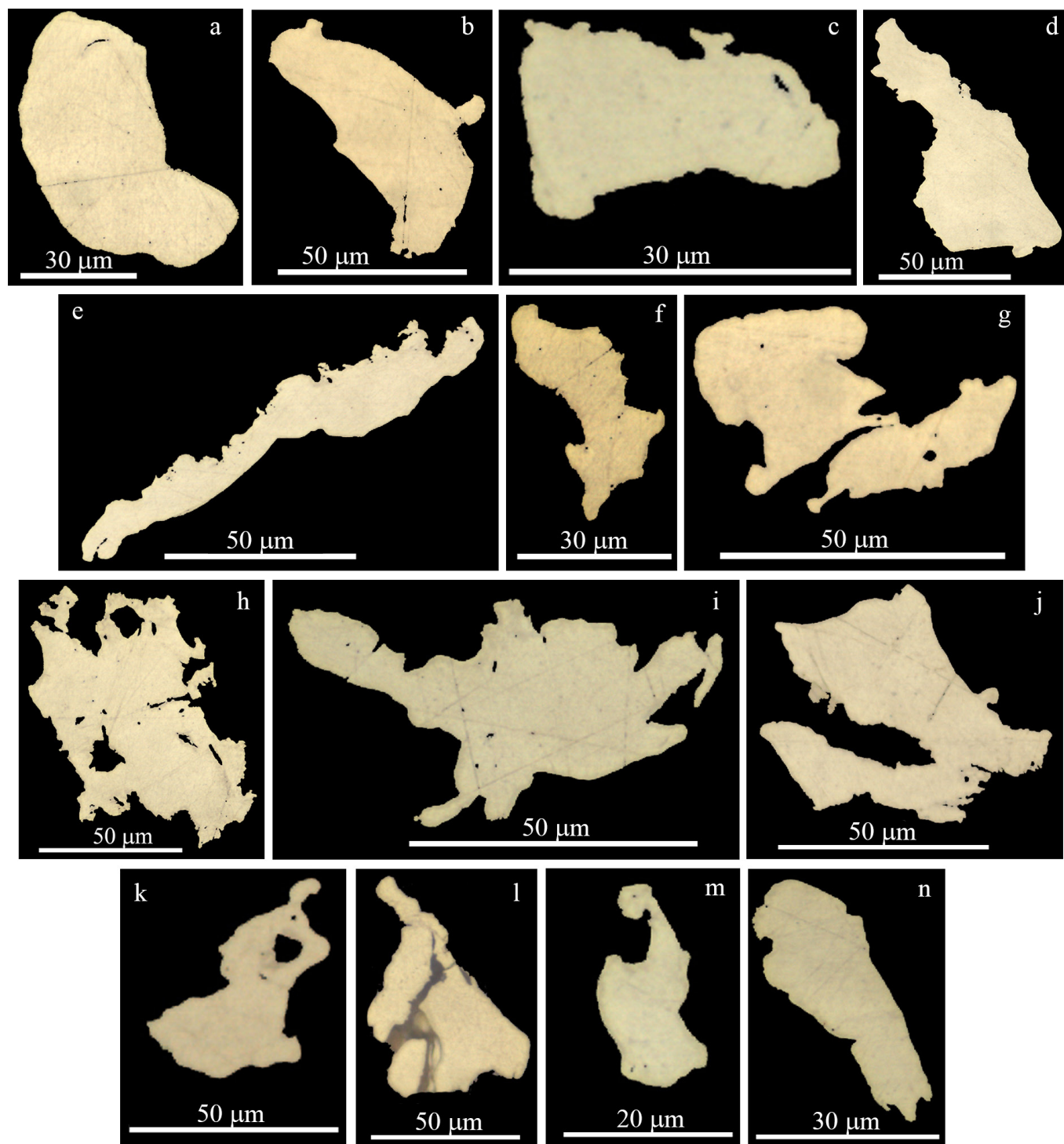


Рис. 3. Морфология самородного золота (фр. $-0.2 + 0.010$ мм): а–с — таблитчатые частицы, близкие к изометричным, d–e — золотины трещинно-прожилкового типа, f — удлиненная трещинно-прожилковая золотина, g–i — комковидные частицы золота, j–k — частицы золота интерстициального облика, l–n — гемидиоморфные частицы самородного золота. HS-концентрат

Fig. 3. Morphology of native gold (fr. $-0.2 + 0.010$ mm): a–c — tabular particles close to isometric, d–e — fracture-strand gold particles, f — elongated fracture-strand gold particles, g–i — lump-like gold particles, j–k — interstitial gold particles, l–n — hemidiomorphic particles of native gold. HS-concentrate

ложенной классификации относится к пылевидному золоту. Эффективное извлечение частиц такой крупности может потребовать флотации или цианирования. Кроме того, порядка 13.7 % самородного золота характеризуется размером 50–100 мкм и относится к тонкому классу. Эта фракция, хоть и составляет меньшую долю, также важна для оценки обогатимости и

подбора специальных технологий и режимов обогащения.

Таким образом, преобладание пылевидных и тонких частиц самородного золота требует детального подхода к разработке и оптимизации технологических процессов для максимального извлечения драгоценного металла.

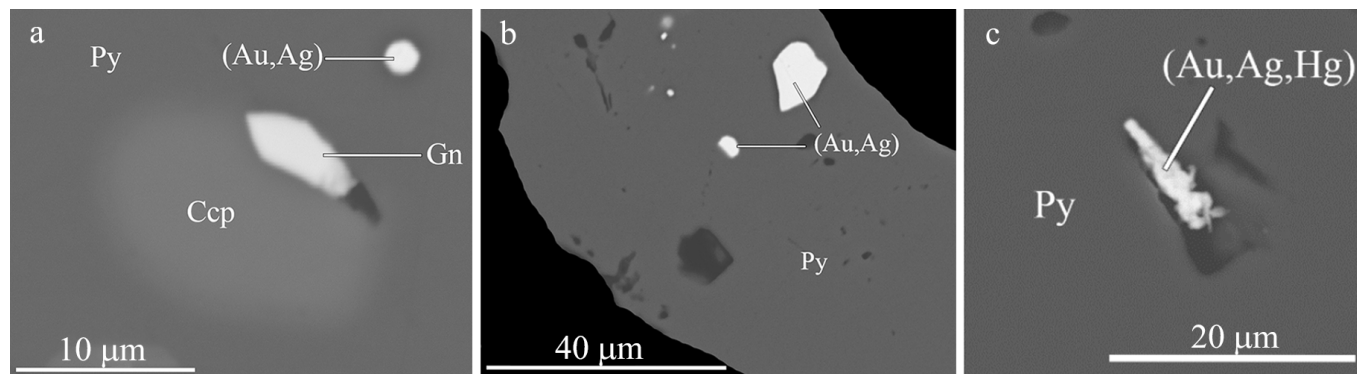


Рис. 4. Морфология частиц золота, связанных с сульфидами: а — вкрапление каплевидного кристалла золота в зерне пирита; б — вкрапления мелких округлых каплевидных кристаллов золота и таблитчатая, плохо образованная золотина с округленными гранями и ребрами в зерне пирита; с — удлиненная золотина с элементами расщепленного строения в пирите. HS-концентрат

Fig. 4. Morphology of gold particles associated with sulfides: a — phenocryst of droplet-like gold crystal in pyrite grain; b — phenocrysts of small rounded droplet-like gold crystals and tabular poorly formed gold with rounded faces and ribs in pyrite grain; c — elongated gold with elements of split structure in pyrite. HS-concentrate

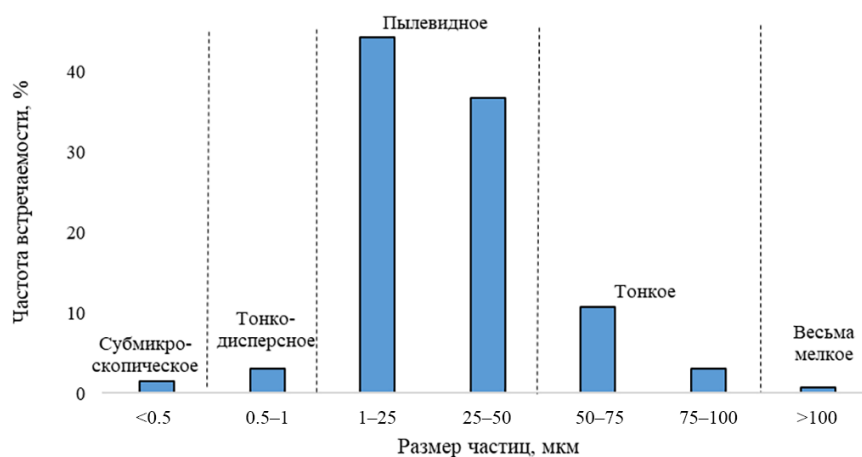


Рис. 5. Оценка встречаемости золота в метасоматитах месторождения по размеру частиц

Fig. 5. Estimation of gold occurrence in the metasomatites of the deposit of grain size distribution of native gold

Химический состав золота

Для исследования вариаций химического состава самородного золота (рис. 6) и его размеров проведена шлифовка и полировка зерен до их срединного сечения в пределах узких размерных фракций концентратов гидросепарации ($-0.125 + 0.071$, $-0.071 + 0.045$, $-0.045 + 0.010$ мм).

Свободное золото. По результатам химических анализов свободных зерен и агрегатов Au определен средний химический состав частиц самородного золота (мас. %): Au = 92.28 ± 0.40 , Ag = 7.01 ± 0.33 ; выборка (n) = 154.

Золото, связанное с сульфидами. При детальном исследовании химического состава включений в сульфидах отмечено две разновидности: серебристое и ртутистое золото. Химический состав серебристого и ртутистого золота (мас. %): Au = 93.03 ± 1.09 , Ag = 6.28 ± 0.97 , n = 46; и Au = 82.86 ± 0.61 , Ag = 13.89 ± 0.51 , Hg = 2.87 ± 0.17 , n = 106 соответственно.

Основным отличием золота в сульфидах от свободных частиц является сильная вариативность химического состава: встречается ртутистая разновидность,

а также более низкие содержания серебра, чем в свободных частицах.

Также отметим, что помимо самородного золота, обнаруженного в «тяжелом» концентрате гидросепарации (HS-концентрате), отмечено одно «тонкое» включение теллурида золота (ECD = 3 мкм) — калаверита (рис. 6, g, h). Его особенностями являются характерные кристаллографические очертания и соответствие состава стехиометрическому. Минерал также ранее описан на схожих месторождениях в работах предшественников (Спиридонов, 2010; Извекова и др., 2021). Средний химический состав калаверита (мас. %): Au = 45.20 ± 1.33 , Te = 54.18 ± 1.38 ; n = 6.

Все указанные минералы благородных металлов в изученной пробе хорошо вскрыты в результате применения ЭИД. Вклад серебристого золота в благороднометалльную минерализацию месторождения составляет 86.02 % от всех минералов золота, представленных в изучаемых метасоматитах. Ртутистое золото также распространено и составляет 11.98 %. Присутствие калаверита считается незначительным, что делает его редким минералом в балансе золота (~ 2.00 %).

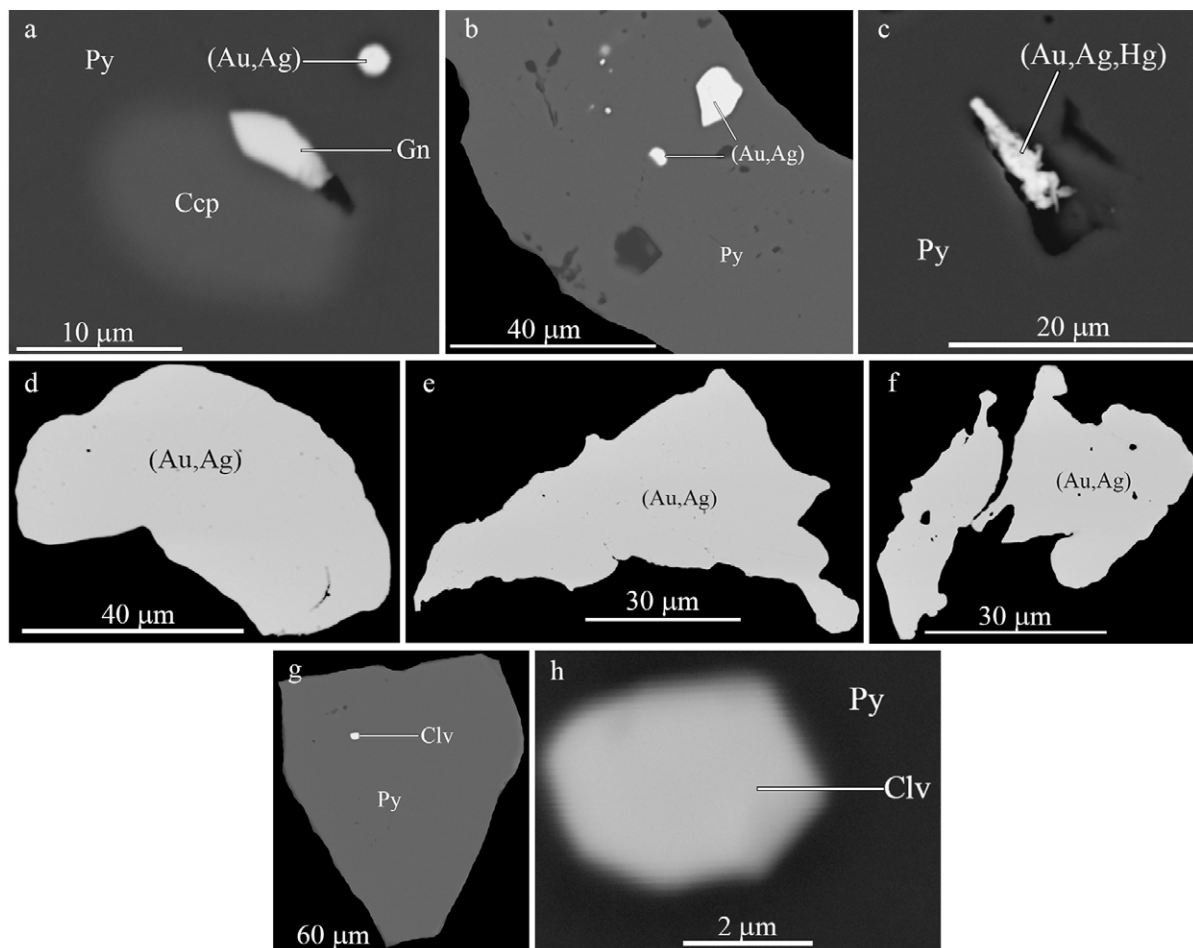


Рис. 6. Формы нахождения золота, полированный шлиф, BSE-фото. Ccp — халькопирит, Gn — галенит, Py — пирит, (Au, Ag) — серебристое золото, (Au, Ag, Hg) — ртутистое золото; Clv — калаверит; а–с — включения самородного золота в сульфиды, d–f — свободные частицы самородного золота, g–h — включение теллурида золота в пирите (калаверит). HS-концентрат

Fig. 6. Forms of gold of the deposit, polished section, BSE-image. Ccp — chalcopyrite, Gn — galena, Py — pyrite, (Au, Ag) — silver gold, (Au, Ag, Hg) — mercury gold; a–c — inclusions of native gold in sulfides, d–f — free particles of native gold, g–h — inclusion of gold telluride in pyrite (calaverite). HS-concentrate

Таблица 2. Химический состав золота из метасоматитов месторождения (рис. 6)

Table 2. Chemical composition of gold from metasomatites of the deposit (fig. 6)

№ образца / Sample №	Au	Ag	Hg	Te	Summary
a	93.82	5.32	–	–	99.14
b	93.74	5.83	–	–	99.57
c	83.99	13.25	2.38	–	99.62
d	88.27	11.63	–	–	99.90
e	90.23	9.85	–	–	100.08
f	93.17	6.47	–	–	99.64
g	43.27	–	–	56.73	100.00
h	42.90	–	–	56.78	99.68

Обсуждение результатов

В пределах золотосульфидного месторождения уточнена «продуктивная» сульфидная минерализация. Полученные данные согласуются с результатами работ по другим объектам Среднего Урала (Рудянско-Февральский узел), в пределах которых отмечаются схожие ряды окорудных изменений и минеральные ассоциации, с которыми связано золото. Для исследуемого месторождения характерно образование бере-

зитов и березитоподобных метасоматитов с сопутствующей им сульфидной минерализацией (пиритовая с незначительным количеством халькопирита, сфалерита, галенита).

На основании данных о содержании благородных металлов и микроэлементов, о количественной оценке зерен в аншлифах и HS-конcentратах, а также данных о составе самих минералов оценен минеральный баланс рудообразующих минералов (табл. 3).



Таблица 3. Содержания рудных минералов в метасоматитах месторождения

Table 3. Ore mineral contents in the metasomatites of the deposit

Минерал Mineral	Формула Formula	Содержание, мас. % Content, wt. %	Доля, % Fraction, %
Главные минералы / Main minerals			
Пирит / Pyrite	FeS ₂	1.286	97.05
Халькопирит / Chalcopyrite	CuFeS ₂	0.020	1.51
Сфалерит / Sphalerite	ZnS	0.015	1.13
Арсенопирит / Arsenopyrite	FeAsS	0.003	0.23
Галенит / Galena	PbS	0.001	0.08
Сумма / Sum		1.325	100.00
Минералы благородных металлов / Minerals of noble metals			
Серебристое золото / Silver-gold	(Au,Ag)	0.000181	86.02
Ртутистое золото / Mercury-gold	(Au,Ag,Hg)	0.000025	11.98
Калаверит / Calaverite	AuTe ₂	0.000004	2.00
Сумма / Sum		0.000211	100.00

По минеральному составу преобладает пирит (~ 97 %), в подчиненных количествах встречаются халькопирит (1.5 %) и сфалерит (1.1 %). Суммарное содержание сульфидов — 1.325 мас. % (табл. 2).

По содержанию сульфидов месторождения золота делят на малосульфидные (до 1–5 мас. %), умеренно сульфидные (5–20 мас. %) и высокосульфидные (более 20 мас. %) (Лодейщиков, 1999; Петровская, 1973; Секисов и др., 2011). Исследуемый объект по предложенной классификации следует отнести к малосульфидному типу золоторудных месторождений. Информация о количественном соотношении сульфидов в исследуемых породах имеет существенное влияние на выбор технологии обогащения для максимального извлечения золота. В случае малосульфидных месторождений наиболее целесообразно использовать гравитационно-цианидную схему обогащения или технологию прямого кучного выщелачивания.

Выводы

1. Метасоматиты месторождения состоят (отн. %): из кварца (38.0), хлорита (24.0), альбита (19.4), кальцита (5.7), доломита (7.0) и серицита (5.9), что позволяет их описать как березитоподобные метасоматиты. В метасоматитах присутствуют сульфиды (первые %), которые представлены главным образом пиритом и небольшим количеством халькопирита, сфалерита, галенита и арсенопирита.

2. Наиболее высокие содержания золота отмечены в классах (мм): $-0.315 + 0.2 = 2.21$ г/т и $-0.045 + 0.010 = 2.00$ г/т. В виде элементов-примесей обнаружены (г/т): Ag — 0.1–0.4, As — 6–14, Bi — 0.2–0.6, Te — 0.16–0.24, Hg — 0.17–0.38, Co — 27–49, Ni — 98–184, Cu — 70–170, Pb — 5–20, Zn — 74–124, Sb — 0.6–1.2.

3. Золото присутствует в самородной форме, в виде включений в сульфидах и в форме теллурида золота — калаверита (AuTe₂). В соответствии с классификацией, предложенной Н. В. Петровской, выявлены различные морфологические формы свободных частиц золота, включая таблитчатые, трещинные, комковидные, интерстициальные и гемиидиоморфные частицы. В сульфидах золото отмечено исключительно

но в пирите в виде преимущественно мелких округлых каплевидных обособлений. По размерным характеристикам порядка 81 % всего золота в метасоматитах относятся к пылевидному классу.

4. Химический состав золота варьирует в зависимости от морфологической разновидности: крупное свободное встречается в виде серебристого золота (до 7.01 мас. % Ag). При изучении включений золота в сульфидах отмечено две разновидности по химическому составу золотин: ртутистое золото (до 2.87 мас. % Hg) и серебристое (до 6.28 мас. % Ag). Стоит отметить, что зафиксированное в сульфидах тонкое серебристое золото менее серебристое, чем свободное. В виде включения в пирите отмечена редкая находка теллурида золота — калаверита, средний химический состав которого (мас. %): Au = 45.20 ± 1.33 , Te = 54.18 ± 1.38 .

5. Сделан расчет минерального баланса главных сульфидных минералов в метасоматитах и минералов золота. Среди главных рудных минералов преобладает пирит (~ 97 %), в незначительных количествах отмечены халькопирит, сфалерит, арсенопирит и галенит. Более 80 % золота в метасоматитах содержится в виде серебристого золота (Au, Ag), ~ 12 % — в виде ртутистого золота (Au, Ag, Hg), наименьший вклад в баланс золота вносит калаверит (AuTe₂) — всего 2 %.

6. Полученная информация о количественном соотношении сульфидов в исследуемых породах имеет существенное влияние на выбор технологии обогащения для максимального извлечения золота. Для обогащения золота из малосульфидных месторождений наиболее целесообразным является использование гравитационно-цианидной схемы обогащения или технологии прямого кучного выщелачивания.

Выражаем искреннюю признательность Д. М. Пастухову (ООО «ПГМИ», Екатеринбург) за предоставленную информацию о результатах тестирования извлечения благородных металлов методами гравитационного обогащения и кучного выщелачивания для месторождения и А. Ю. Пузику (ФГБОУ ВО «ПГНИУ», г. Пермь) за выполнение химических анализов на микроэлементах. Работа выполнена в Ресурсном центре микроскопии и микроанализа СПбГУ.



Литература / References

- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевой базы Российской Федерации в 2021 году / Глав. ред. Д. Д. Тетенькин, Е. И. Петров. М., 2022. 626 с.
- State report on the state and use of the mineral resource base of the Russian Federation in 2021. Chief editors D. D. Tetenkin, E. I. Petrov. Moscow, 2022, 626 p. (in Russian)
- Гудков С. С., Рязанова И. И., Шкетова Л. Е., Емельянов Ю. Е. Биогидрометаллургическая переработка сульфидных руд // Цветные металлы. 2004. № 8. С 47–48.
- Gudkov S. S., Ryazanova I. I., Shketova L. E., Emelianov Yu. E. Biohydrometallurgical processing of sulfide ores. Non-ferrous metals, 2004, No. 8, pp. 47–48. (in Russian)
- Гудков А. С., Минеев Г. Г., Жучков И. А. Оценка автоклавного окисления сульфидных концентратов применительно к последующему сульфит-тиосульфатному выщелачиванию благородных металлов // Вестник ИрГТУ. 2010. № 3. С. 84–90.
- Gudkov A. S., Mineev G. G., Zhuchkov I. A. Evaluation of autoclave oxidation of sulfide concentrates as applied to subsequent sulfite-thiosulfate leaching of precious metals. Bulletin of IrSTU. 2010, No. 3, pp. 84–90. (in Russian)
- Зорин А. С. Электроимпульсная технология дробления твёрдых диэлектрических материалов. Факторы, оказывающие влияние на динамику разрядных процессов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13. № 3. С. 87–96. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.009
- Zorin A. S. Electric pulse technology for crushing solid dielectric materials. Factors influencing the dynamics of discharge processes. Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical sciences, 2022, V. 13, No. 3, pp. 87–96. (in Russian)
- Извекова А. Д., Дамдинов Б. Б., Дамдинова Л. Б., Москвитина М. Л. Золото-теллуридная минерализация в рудах Пионерского золото-кварцевого месторождения (Восточный Саян, Россия) // Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 6. С. 498–519. DOI: 10.31857/S0016777021060022
- Izvekova A. D., Damdinov B. B., Damdinova L. B., Moskvitina M. L. Gold-telluride mineralization in ores of the Pionerskoye gold-quartz deposit (Eastern Sayan, Russia). Geology of ore deposits, 2021, V. 63, No. 6, pp. 498–519. (in Russian)
- Казаков И. И., Стороженко Е. В., Харитонов И. Н., Стефановский В. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000 (издание второе). Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXVI (Асбест). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2017, 284 с. + 13 вкл.
- Kazakov I. I., Storozhenko E. V., Kharitonov I. N., Stefanovsky V. V., et al. State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1 : 200,000 (second edition). Middle Ural Series. Sheet O-41-XXVI (Asbestos). Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2017, 284 p. + 13 incl.
- Кучерский Н. И. Современные технологии при освоении коренных месторождений золота. М.: Руда и металлы, 2007. 696 с.
- Kucherskiy N. I. Modern technologies in the development of primary gold deposits. Moscow: Ore and Metals. 2007, 696 p. (in Russian)
- Личманова А. И. Применение ультразвука в подготовке почв к механическому анализу // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 1972. Вып. 4. С. 42–47.
- Lichmanova A. I. Application of ultrasound in soil preparation for mechanical analysis. Bulletin of the Soil Institute named after V. V. Dokuchaev. 1972, 4, pp. 42–47. (in Russian)
- Лодейщиков В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 775 с.
- Lodeyshchikov V. V. Technology of gold and silver extraction from refractory ores. Irkutsk: Irgiredmet, 1999, 775 p. (in Russian)
- Николаева Л. А., Гаврилов А. М., Некрасова А. Н., Яблокова С. В., Шатилова Л. В., Позднякова Н. Н. Изучение самородного золота при геологоразведочных работах: Метод. рекомендации. Изд. второе, перераб. и доп. / Отв. ред. А. И. Черных. М.: ЦНИГРИ, 2023. 74 с.
- Nikolaeva L. A., Gavrilov A. M., Nekrasova A. N., Yablokova S. V., Shatilova L. V., Pozdnyakova N. N. Study of native gold in geological exploration. Methodical recommendations. Second edition, revised. and additional. Ed. A. I. Chernykh. Moscow: TsNIGRI, 2023, 74 p. (in Russian)
- Патент № 2281808. Гидравлический классификатор. Заявлено 08.12.2004. Опубликовано 20.08.2006. Бюл. № 23 / Н. С. Рудашевский, В. Н. Рудашевский. Patent No. 2281808. Hydraulic classifier. N. S. Rudashevsky, V. N. Rudashevsky; Claimed 08.12.2004. Published 20.08.2006. Bulletin No. 23. (in Russian)
- Петровская Н. В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М.: Наука, 1973. С. 349.
- Petrovskaya N. V. Native gold (general characteristics, typomorphism, issues of genesis). Moscow: Nauka, 1973, p. 349. (in Russian)
- Рудашевский Н. С., Бураков Б. В., Лупал С. Д., Шулояков А. Д., Курец В. И. Электроимпульсная дезинтеграция — оптимальная технология высвобождения ненарушенных зерен акцессорных минералов // Докл. АН СССР. 1991. Т. 319. № 1. С. 219–222.
- Rudashevsky N. S., Burakov B. V., Lupal S. D., Shuloyakov A. D., Kurets V. I. Electropulse disintegration is an optimal technology for releasing undisturbed grains of accessory minerals. Doklady Earth Sciences, 1991, V. 319, No. 1, pp. 219–222. (in Russian)
- Рудашевский Н. С., Рудашевский В. Н., Антонов А. В. Универсальная минералогическая технология исследования пород, руд и технологических продуктов // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 88–102.
- Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N., Antonov A. V. Universal mineralogical technology for the study of rocks, ores and technological products. Regional Geology and Metallogeny, 2018, No. 73, pp. 88–102. (in Russian)
- Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала: Научное издание (второе, исправленное и дополненное). Екатеринбург: Изд-во УГГТА, 2001. 622 с.
- Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu. A. Gold deposits of the Urals: Scientific publication (second, corrected and supplemented). Yekaterinburg: USMGA Publishing house, 2001, 622 p. (in Russian)



- Серавкин И. Б. Эндогенная металлогения золота // Геологический сборник № 8 / ИГ УНЦ РАН. Уфа, 2009. С. 164–176.
- Seravkin I. B. Endogenous metallogeny of gold. Geological collection No. 8. IG Ufa SC RAS, Ufa, 2009, pp. 164–176. (in Russian)
- Секисов Г. В., Соболев А. А., Нугай Е. В. Типы маломасштабных золоторудных месторождений Дальневосточного региона и основные направления их рационального освоения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 2. С. 192–201.
- Sekisov G. V., Sobolev A. A., Nigay E. V. Types of small-scale gold deposits in the Far Eastern region and the main directions of their rational development. Mining information and analytical bulletin, No. 2, 2011, pp. 192–201. (in Russian)
- Спиридонов Э. М. Обзор минералогии в ведущих типах Au-минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: Труды Всеросс. (с междунар. уч.) науч. конф., посвящ. 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, 26–29 сентября 2010 г. / Ред. Ю. Л. Войтеховский. Апатиты: Изд-во К&М, 2010. 228 с.
- Spiridonov E. M. Review of mineralogy in the leading types of Au mineralization. Gold of the Kola Peninsula and adjacent regions. Proceedings of the All-Russian (with international participation) scientific conference dedicated to the 80th anniversary of the Kola SC RAS. Apatity, September 26–29, 2010. Ed. Yu. L. Voitekhovsky. Apatity: K&M Publishing House, 2010, 228 p. (in Russian)
- Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности // Машиностроение. СПб., 1986. 252 с.
- Yutkin L. A. Electrohydraulic effect and its application in industry. Mechanical engineering. St. Petersburg, 1986, 252 p. (in Russian)
- Ernawati R. et al. Study of the optimization of gold ore concentration using gravity separator (shaking table): case study for LS epithermal gold deposit in Artisanal Small scale Gold Mining (ASGM) Paningkaban, Banyumas, Central Java / 2018 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 212 012019
- Lastra R. Pric J., Cabri L. J. et al. Gold characterization of a sample from Malartic East (Québec) using concentration by hydroseparator // Proc. International Symposium on the Treatment of Gold Ores, Calgary, Alberta // Eds. by G. Deschênes, D. Houdin, L. Lorenzen. 2005. P. 17–29.
- Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N., Lupal S. D. Method for separating granular materials and device for carrying out said method // Patent Cooperation Treaty PCT/RU01/00123, Moscow, 20 April 2001, 10 May 2001. (Russian and English text).
- Travis J. M., Daniel W. K. Precious metal heap leach design and practice. In: SME Mining Engineering Handbook. Third Edition. 2011 Vol.1. Published 2011 by SME (1073).

Поступила в редакцию / Received 04.09.2024

Петрофизическое группирование сланцевых пород неркаюского комплекса (Приполярный Урал)

Т. А. Пономарева, Е. В. Кушманова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

TA.Ponomareva@inbox.ru

Представлены результаты петрофизического группирования сланцевых пород неркаюского комплекса, проведенного с использованием петрофизических, петрографических и петрохимических данных. Впервые выделены четыре петрофизические группы кристаллических сланцев, отличающиеся вещественным составом, физическими параметрами и генезисом. По плотности выделены две петрогруппы. Первую петрогруппу, с пониженными плотностями, представляют сильно рассланцованные гранатосодержащие и гранатовые кварц-клинозоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы, образовавшиеся по глинистым породам. Вторая петрогруппа пород, с повышенными плотностями, состоит из гнейсоподобных сланцев, протолитами которых были песчаники, а также апобазальтовые, преимущественно амфиболовые сланцы. По магнитным свойствам выделяются четыре петромагнитные группы: две немагнитные, зависящие от породообразующихся минералов, и две магнитные, обусловленные количеством магнетита, сформированного при вторичных (наложенных) процессах.

Ключевые слова: сланцы, состав, плотность, магнитная восприимчивость, неркаюский комплекс, Приполярный Урал

Petrophysical grouping of schist rocks of the Nerkey complex (the Nether-Polar Urals)

T. A. Ponomareva, E. V. Kushmanova

Institute of Geology Komi Scientific SC UB RAS, Syktyvkar, Russian

The article presents results of petrophysical grouping of schist rocks of the Nerkey complex using petrophysical, petrographic and mineralogical data. Among crystalline schists, four petrogroups differing by material composition, physical parameters and genesis are identified for the first time. Two petrogroups are distinguished by density. The first petrogroup with low densities is represented by highly foliated garnet-bearing and garnet quartz-clinzoisite-amphibole-chlorite-muscovite-albite schists formed over clayey rocks. The second petrogroup of rocks with increased densities consists of gneissose rocks, the protolith of which was sandstones, as well as apobasaltic predominantly amphibole schists.

According to their magnetic properties, four petromagnetic groups are distinguished: two non-magnetic, depending on the rock-forming minerals, and two magnetic, determined by the amount of magnetite formed during secondary (superimposed) processes.

Keywords: schists, composition, physical properties, density, magnetic susceptibility, Nerkey complex, Nether-Polar Urals

Введение

Неркаюский эклогит-сланцевый комплекс расположен в северо-восточной части Приполярного Урала (рис. 1). Неркаюский комплекс относится к Западно-Уральской структурной зоне и заключен между двумя глубинными разломами: Эрепшорским на западе и Главным Уральским — на востоке. Исследуемый комплекс вытянут в северо-восточном направлении с юга на север по правобережью р. Хулги от ее крупного притока — р. Хальмерью — до р. Бол. Тыкотлова на 85 км при ширине до 16 км. Образование комплекса представлены различными по составу высокобарическими метаморфическими породами. В основном это слюдяные, хлоритовые, амфиболовые и глаукофановые сланцы. Они составляют 70–80 % метаморфического комплекса. В подчиненном положении находятся metabazites неркаюского комплекса, которые в основном наблюдаются в северной части комплекса (Государственная..., 2007).

Среди геологов пока нет единого мнения по поводу строения неркаюского комплекса, возраста пород, количества и последовательности этапов метаморфических процессов (Пыстин и др., 1980, 1983, 1994; Иванов и др., 1981; Пучков и др., 1983, 1986; Вализер, Ленных, 1988; Gómez-Pugnaire and at., 1997; Григорьев и др., 2005; Ремизов и др., 2006). Одни специалисты предполагают, что породы комплекса образовались в амфиболитовую фацию метаморфизма в докембрийское время, а затем претерпели эклогитизацию и глаукофанитизацию в палеозое (Пучков, Карстен, 1986). Согласно мнению других исследователей, полиметаморфизм (амфиболитизация и эклогитизация) проявился в докембрии, а низкотемпературные изменения породы претерпели в процессе диафореза в палеозойское время (Пыстин и др., 1983, Вализер, Ленных, 1988). Согласно мнению еще одной группы геологов, эклогиты, глаукофановые сланцы и амфиболиты образуются в течение одного палеозойского тектониче-

Для цитирования: Пономарева Т. А., Кушманова Е. В. Петрофизическое группирование сланцевых пород неркаюского комплекса (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. 2025. 1(361). С. 14–24. DOI: 10.19110/geov.2025.1.2

For citation: Ponomareva T. A., Kushmanova E. V. Petrophysical grouping of schist rocks of the Nerkey complex (the Nether-Polar Urals). Vestnik of Geosciences, 2025, 1(361), pp. 14–24, doi: 10.19110/geov.2025.1.2

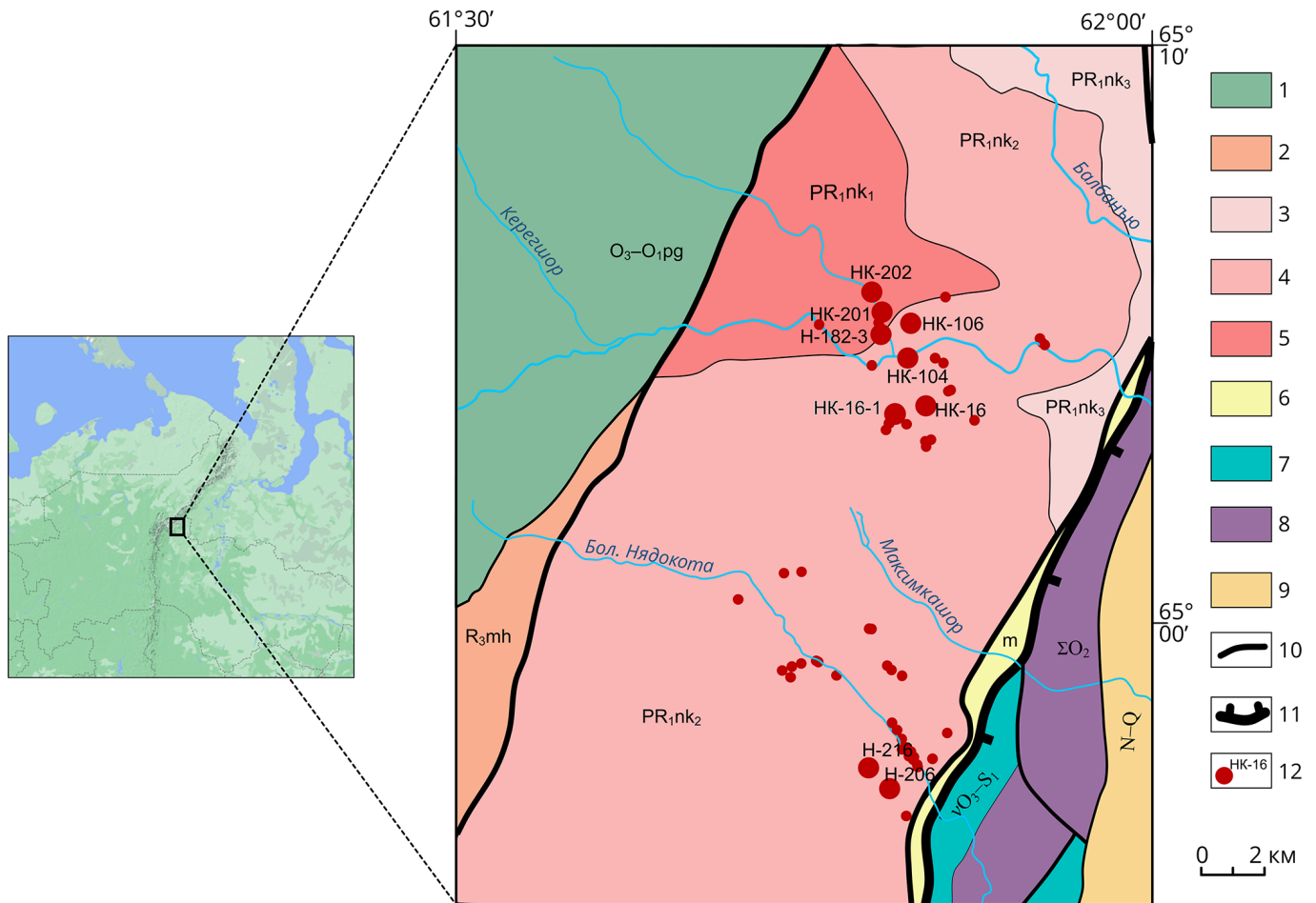


Рис. 1. Схема расположения и геологическое строение северной части неркаюского комплекса Приполярного Урала (Государственная..., 2007): 1 — погурейская свита (нерасчлененные образования O_3-O_{1pg}); 2 — малохосайнская толща (R_3mh); 3–5 — неркаюская свита: 3 — верхняя подсвита (PR_{1nk_3}): кристаллические сланцы, амфиболиты, эклогиты, кварциты, гнейсы; 4 — средняя подсвита (PR_{1nk_2}): кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты, гнейсы; 5 — нижняя подсвита (PR_{1nk_1}): кристаллические сланцы, амфиболиты, эклогиты, кварциты, гнейсы; 6 — кемпирсайско-войкарский комплекс тектонитов (m); 7 — габбровый комплекс (vO_3-S_1); 8 — гипербазитовый комплекс (ΣO_2); 9 — неоген-четвертичные отложения (N-Q); 10 — границы неркаюского комплекса; 11 — Главный Уральский разлом (надвиг); 12 — места отбора образцов

Fig. 1. Location diagram and geological structure of the Nerkayu complex of the northern part of the Subpolar Urals (State..., 2007): 1 — Pogurey Formation (undivided formations O_3-O_{1pg}); 2 — Malokhosainskaya strata (R_3mh); 3–5 — Nerkayu formation: 3 — upper subformation (PR_{1nk_3}): crystalline schists, amphibolites, eclogites, quartzites, gneisses; 4 — middle subformation (PR_{1nk_2}): crystalline schists, amphibolites, quartzites, gneisses; 5 — lower subformation (PR_{1nk_1}): crystalline schists, amphibolites, eclogites, quartzites, gneisses; 6 — Kempirsay-Voykar tectonite complex (m); 7 — gabbro complex (vO_3-S_1); 8 — hypermafic complex (ΣO_2); 9 — Neogene-Quaternary deposits (N-Q); 10 — boundaries of the Nerkayu complex; 11 — Main Ural fault (thrust); 12 — places of sampling

ского этапа (Григорьев и др., 2005, Ремизов и др., 2006). Высокобарический метаморфизм неркаюского комплекса они связывают с погружением палеозойских образований в составе аккреционной призмы в зону субдукции.

Изучение физических свойств пород на Урале начались с 1964 года во время проведения крупномасштабного геологического картирования перспективных территорий. В задачи петрофизики входили обоснование выбора геофизических методов и эффективная интерпретация геофизических данных как наиболее важных для изучения глубинного строения Уральского региона. Результаты изучения физических свойств пород по Южному и Среднему Уралу детально представлены в работах Е. С. Родионова, Н. Б. Пунегова, Н. А. Плохих, Н. Ф. Донукалова, Б. К. Кунщикова и других исследователей. Особого внимания

заслуживают региональные петрофизические исследования Н. Б. Дортман, в том числе по Уральскому региону. Огромный вклад в области наук о Земле внесли петрофизические данные пород Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4). С 1991 года в связи с уменьшением заинтересованности в региональных геологических исследованиях на Урале, как следствие, снизился интерес к геофизическим и петрофизическим работам. Тем не менее накопленный фактический материал по Уральскому региону был использован в ряде руководств (Методические..., 1983), а также в учебных пособиях по петрофизике и справочниках. Сведения о физических свойствах пород севера Урала находятся в основном в материалах «Комигеолфонда» и научных публикациях (Пономарева и др., 2014, 2016; 2022, 2024). При проведении петрофизических исследований ставились следующие задачи: изучение

физических свойств сланцевых пород неркаюского комплекса и выявление причин их изменчивости; проведение петрофизического группирования пород с учетом закономерностей, выявленных в комплексе с петрографическими и петрохимическими данными. Решение поставленных задач более эффективно помогает выявить определенные петрофизические группы пород в аномалиях гравитационного и магнитного полей.

Петрофизическая неоднородность пород неркаюского комплекса ранее была обнаружена на примере метабазитов (Пономарева, Кушманова, 2022). Новые данные указали одновременно на определенную схожесть в характере распределения свойств в амфиболитах и эклогитах и различие в причинах их изменчивости. Например, корреляционный анализ удельной магнитной восприимчивости выявил деление метабазитов на немагнитные и магнитные петрогруппы. Петрографическое описание указало на значительное усиление магнитных свойств только у диафорированных и метасоматически измененных амфиболитов, связанное с повышенными содержаниями ильменита, магнетита и титаномagnetита в породах. Рост магнитной восприимчивости у эклогитов связан с эпидотизацией, в процессе которой развивается магнетит. Среди метаморфических образований неркаюского комплекса метабазиты составляют менее 20 %, в основном комплекс представлен кристаллическими сланцами различного состава, которые являются объектом нашего внимания. По сути, данная работа является продолжением ранее начатых комплексных петрофизических исследований в неркаюском эклогит-амфиболит-сланцевом комплексе.

Методы исследований

Петрографическое описание пород проводилось в шлифах на поляризационном микроскопе «БиОптик СР-400» («БиОптик», РФ). Рудные минералы изучались на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA3 LMN (TESCAN, Czech Republic). Химический состав пород получен методом мокрой химии и комплексного метода мокрой химии и рентгенофлуоресцентного анализа. Измерения физических свойств, петрографическое описание пород, определение химического состава кристаллических сланцев проводились в лабораторных условиях Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Плотность определялась методом гидростатического взвешивания с помощью весов «Меттлер Толодо». Магнитная восприимчивость пород измерялась в порошковом виде на приборе Kappabridge KLY (Geofizika BRNO, Czechoslovakia) с точностью измерения 0.2–1 %. Каждая протоколочная проба измерялась трижды. Значения плотности и магнитной восприимчивости обрабатывались методами математической статистики (Дементьев и др., 1977; Stuart, Ord, 1994), в результате чего были построены гистограммы и вариационные кривые. Также для анализа графиков распределения рассчитаны числовые характеристики: среднее значение (η), мода (M_o), медиана (M_e), среднеквадратичные отклонения (σ), дисперсия (D), коэффициент корреляции (r), асимметрия (as) и другие. Всего изучено 40 образцов пород.

Петрографические особенности сланцевых пород неркаюского комплекса

Широко развитые в неркаюском комплексе кристаллические сланцы разнообразны по вещественному составу и дифференцированы по физическим свойствам (табл. 1).

В результате изучения сланцевых пород северной части неркаюского комплекса установлено, что среди них наиболее распространены гранатсодержащие и гранатовые кварц-клиноцоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые (нк-14, нк-16, нк-16-1, нк-106, нк-104, н-206, нк-201). В подчиненном количестве присутствуют гранат-мусковитовые гнейсоподобные сланцы с хлоритом (н-216), кварц-клиноцоизит-хлорит-амфибол-альбитовые сланцы (нк-202) и кварц-хлорит-мусковит-глаукофан-карбонатные породы (н-182-3, нк-203).

Гранатсодержащие и гранатовые кварц-клиноцоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы (рис. 2, а, б) имеют гранолепидобластовую, порфиробластовую, мелко- и среднезернистую структуру, сланцеватую и очковую текстуру. В переменном количестве в породах содержатся (об. %): мусковит (10–30), альбит (10–40), кварц (10–15), амфибол (глаукофан, барруазит) (3–15), хлорит (5–20), клиноцоизит (2–10), гранат (1–10), апатит (1), рутил (1–3), магнетит, ильменит (ед. зерна — 3). В породе наблюдаются порфиробласты граната и альбита, между которыми развиваются зерна амфибола, клиноцоизита и чешуйки мусковита и хлорита. Гранат представлен идиоморфными изометричными зернами размером от 0.1 до 1 мм, содержит включения рутила и кварца. Минерал замещается по краям и трещинкам хлоритом. Гранаты иногда образуют структуру «снежного кома». Крупные порфиробласты образуют также зерна удлиненно-линзовидного альбита размером до 2–3 мм. Минерал имеет многочисленные включения удлиненного, изометричного мелкого кварца, амфибола и (редко) мусковита. Часто в альбите можно увидеть простые двойники. Амфибол представлен призматическими изометричными зернами размером 0.2–0.4 мм, редко до 0.7 мм. Минерал плеохроирует от бледно-зеленого до голубовато-зеленого или фиолетового и представлен, скорее всего, щелочным натриевым амфиболом — барруазитом и глаукофаном. По краям, а иногда полностью, амфибол замещается хлоритом. Мусковит представлен вытянутыми в одном направлении чешуйками размером до 1.5, редко до 2 мм, формирует сланцеватую текстуру породы. Хлорит образует крупные чешуйки размером до 3 мм, плеохроирует от бледно-зеленого до зеленого. Минерал развивается как по направлению, так и перпендикулярно сланцеватости, образует сноповидные и радиально-лучистые агрегаты, имеет включения кварца, редко слюды. Рутил представлен изометричными удлиненными зернами размером до 0.1 мм, часто развивается вокруг ильменита. Он просвечивает бурым, темно-коричневым цветом.

Изредка в породах (рис. 2, с, d) наблюдаются участки (прослойки, прожилки, изометричные обособления), выполненные зернами кварца. По всей видимости, кварц (в большей степени) и хлорит являются наложенными минералами по отношению к другим поро-

Таблица 1. Содержания породообразующих оксидов (мас. %) и физические параметры сланцев неркаюского комплекса

Table 1. Rock-forming oxides content (wt. %) and physical parameters of schists of the Nerkaу complex

nn	Nº образцов Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	п.л.п. LOI	Сумма Sum	Fe ₂ O ₃ общ	%, n × 10 ⁻⁸ [SI]	ρ, n × 10 ³ кг/м ³
1	нк-14	59.54	1.07	17.64	2.00	4.91	0.11	3.02	1.61	4.13	1.68	0.19	2.74	99.13	7.4	19.19	2.82
2	нк-14-2	66.97	0.46	15.85	1.29	3.64	0.1	1.88	1.50	4.50	0.87	0.51	2.44	100	5.33	15.56	2.71
3	нк-16	61.04	0.87	16.65	2.26	4.38	0.12	3.05	1.66	3.45	2.32	0.48	2.65	99.37	7.08	16.53	2.74
4	нк-16-1	63.03	0.6	18.37	1.32	3.55	0.06	2.15	1.39	3.06	3.16	0.49	2.82	100	5.26	12.48	2.73
5	нк-16-3	60.54	0.59	19.04	1.01	5.14	0.07	2.62	0.97	3.94	2.10	0.53	3.47	100	6.71	17.06	2.76
6	н-166-1	66.68	0.70	15.93	3.66	2.91	0.04	2.12	0.85	2.00	2.46	0.07	2.59	100	6.89	10.04	2.74
7	нк-205	68.08	0.50	15.12	2.75	2.55	0.11	2.25	2.67	2.6	1.91	0.34	1.12	100	5.58	16.90	2.75
78	нк-201	59.6	0.52	13.16	2.38	2.86	0.09	2.2	2.26	3.55	1.00	0.35	2.04	100	5.55	359.34	2.78
9	нк-111	61.73	0.53	18.39	1.90	3.92	0.1	2.29	1.4	1.88	3.83	0.53	3.50	100	6.25	50.64	2.83
10	нк-109	62.23	0.58	18.15	2.15	3.4	0.11	2.07	1.61	2.22	3.44	0.63	3.40	100	5.92	85.25	2.71
11	нк-106	68.34	0.48	14.35	2.62	2.25	0.1	2.40	2.28	4.07	0.66	0.37	2.08	100	5.12	165.80	2.75
12	н-206	59.77	0.80	17.33	3.12	4.5	0.34	3.31	2.61	2.46	2.46	0.22	3.08	100	8.12	19.07	2.85
13	н-146-1	73.86	0.91	10.4	1.69	4.19	0.09	2.00	1.39	2.58	0.90	0.11	1.88	100	6.34	14.62	2.75
14	н-147-1	72.83	1.00	10.98	1.58	4.29	0.10	2.04	1.78	2.43	1.14	0.08	1.75	100	6.34	15.30-	2.80
15	н-62	75.38	0.63	9.78	1.46	2.57	0.10	1.35	2.58	2.13	0.31	0.091	3.25	99.89	4.29	6.86	2.68
16	н-63	77.22	0.67	10.23	1.95	2.27	0.04	1.41	0.84	1.28	1.60	0.06	2.44	100	4.47	15.84	2.71
17	н-216	70.03	0.74	13.22	1.77	4.41	0.08	2.63	0.49	2.48	1.14	0.08	2.95	100	6.66	16.44	2.69
18	н-217	75.13	0.97	9.53	1.53	4.33	0.09	1.59	1.69	2.85	0.61	0.11	1.59	100	6.34	12.63	2.74
19	н-210	77.2	0.12	13.04	0.84	0.72	0.03	0.43	0.3	4.93	1.20	0.04	1.16	100	1.64	8.19	2.62
20	н-182-3	40.52	0.64	10.09	3.07	5.89	0.37	11.31	9.45	3.44	1.03	0.35	13.73	100.48	9.55	240.85	2.88
21	н-184-1	39.48	0.65	9.92	3.20	5.75	0.36	11.16	9.67	3.18	0.98	0.38	13.96	99.26	9.52	287.27	2.94
22	нк-202	51.5	1.07	13.29	5.82	6.95	0.24	5.7	8.28	2.66	0.05	0.89	3.54	100	13.53	2866.73	2.99

Примечание. 1-19 — паропороды; 1-12 — гранатсодержащие и гранатовые кварц-клиноизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы; 1-7 — немагнитные, 7-11 — магнитные; 12-19 — гранат-мусковитовые гнейсоподобные сланцы; 20-22 — ортопороды; 20, 21 — кварц-хлорит-мусковит-глагоуфан-карбонатные породы; 22 — кварц-клиноизит-хлорит-амфибол-альбитовые сланцы.

Note. 1-19 — pararocks; 1-12 — garnet-bearing and garnet quartz-clinozoisite-amphibole-chlorite-muscovite-albite schists; 1-7 — non-magnetic, 7-11 — magnetic; 12-19 — garnet-muscovite gneiss-like schists; 20-22 — orthorocks; 20, 21 — quartz-chlorite-muscovite-glaucophane-carbonate rocks; 22 — quartz-clinozoisite-chlorite-amphibole-albite schists.

дообразующим составляющим. В породах, где увеличивается содержание крупночешуйчатого хлорита и кварца (нк-106, нк-104, нк-201), наблюдается повышенное содержание магнетита. Магнетит размером до 0.1, редко до 0.2 мм, в сечении имеет неправильную четырехугольную форму. В отраженном свете стально-серый.

Гранат-мусковитовые гнейсоподобные сланцы с хлоритом (или без хлорита) (н-216) имеют лепидогранобластовую, мелко- и среднезернистую структуру, слан-

цеватую или гнейсовидную текстуру (рис. 2, е, ф). Порода состоит (об. %): из кварца (30–40), альбита (20–25), хлорита (10), мусковита (10–15), граната (1), титанита (менее 1), рутила (1) сульфидов и ильменита (1–2).

Порода вмещает удлиненные изометричные таблитчатые зерна альбита размером до 2–3 мм с включениями мелкого кварца, рутила, и мусковита, а также угловатых, удлиненных, неправильной формы зерен кварца размером до 1 мм. В альбите наблюдаются простые двойники. Между зернами кварца и

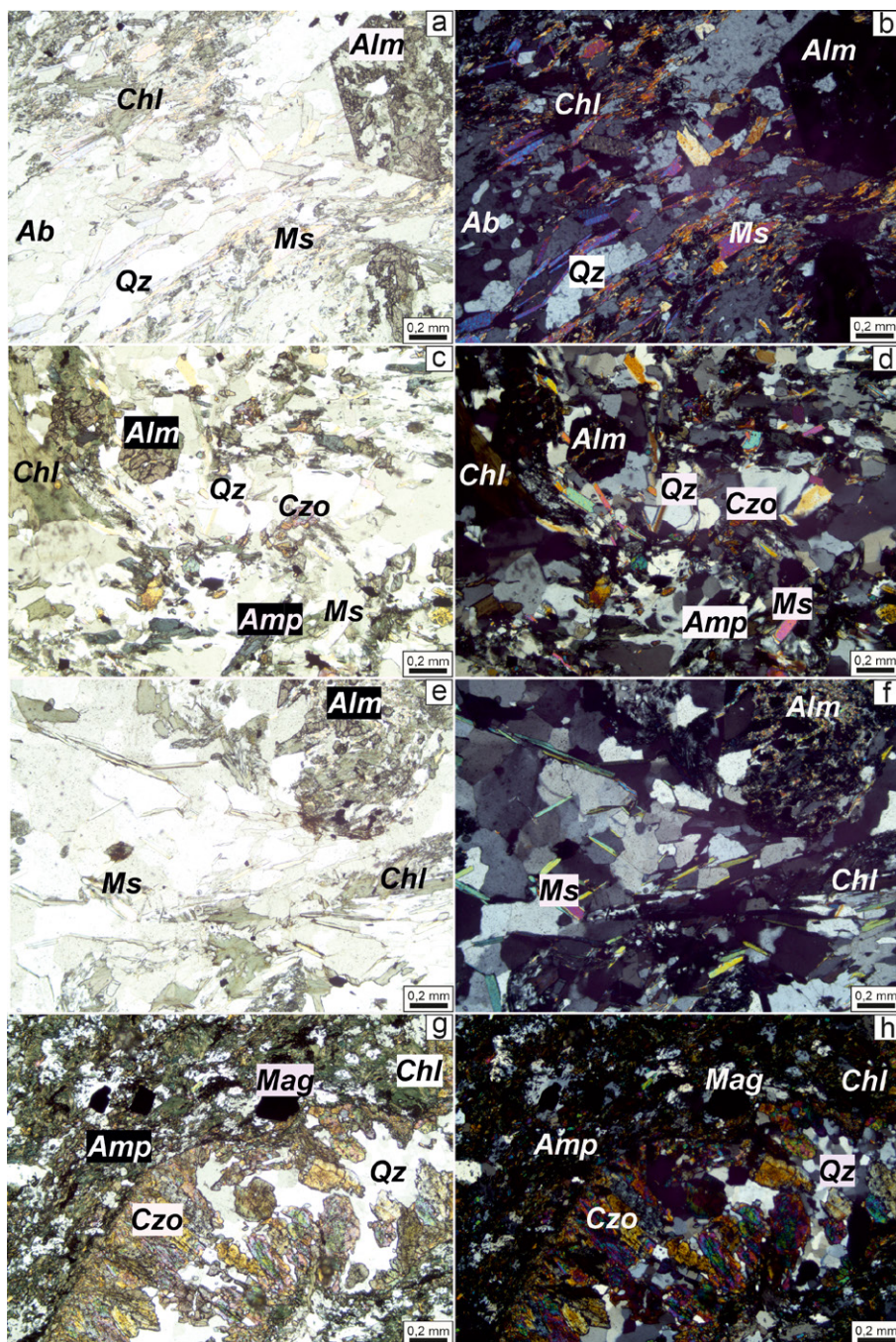


Рис. 2. Гранатовые кварц-клинозоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы (нк-14) — а, б; окварцованный, хлоритизированный сланец (нк-201) — с, д; гранат-мусковитовый гнейсоподобный сланец (н-216) — е, ф; кварц-клинозоизит-хлорит-амфибол-альбитовые сланцы (нк-202) — г, х. Фото сделаны в параллельных и скрещенных николях: Alm — альмандин (гранат), Amp — амфибол, Ms — мусковит, Qz — кварц, Ab — альбит, Czo — клинозоизит, Mag — магнетит, Chl — хлорит

Fig. 2. Garnet quartz-clinozoisite-amphibole-chlorite-muscovite-albite schists (nk-14) — a–b; silicified, chloritized schist (nk-201) — c–d; garnet-muscovite gneiss-like schist (n-216) — e–f; quartz-clinozoisite-chlorite-amphibole-albite schists (nk-202) — g–h. Photos were taken in parallel and crossed nicols: Alm — almandine (garnet), Amp — amphibole, Ms — muscovite, Qz — quartz, Ab — albite, Czo — clinozoisite, Mag — magnetite, Chl — chlorite



альбита развиваются чешуйки мусковита размером до 0.8 мм, ориентированные в одном направлении. В породе наблюдаются также чешуйки хлорита размером до 1 мм, развивающиеся как по гнейсовидности, так и поперек. Они часто образуют сноповидные агрегаты. Изометричные зерна граната размером до 1 мм практически полностью заместились хлоритом, серицитом и кварцем. Рутил часто развивается вокруг ильменита неправильной формы размером до 0.1–0.2 мм. Встречаются зерна сульфидов кубической изометрической формы размером до 0.5 мм.

Кварц-клиноцоизит-хлорит-амфибол-альбитовые сланцы (нк-202) имеют лепидонематогранобластовую, порфиробластовую, мелко- и среднезернистую структуру, слабосланцеватую и плейчатую текстуру (рис. 2, g, h). Порода состоит (об. %) из: альбита (25–30), амфибола (15–20), кварца (10–12), хлорита (15–20), клиноцоизита (5–10), карбоната (1–2), титанита (1–3) магнетита (5). Порода сложена изометричными, линзовидными порфиробластами альбита размером до 0.6 мм, с мелкими включениями клиноцоизита, амфибола и кварца. Между зернами альбита расположены призматические зерна клиноцоизита и амфибола, чешуйки хлорита, а также кварца размерами до 0.4 мм. Амфибол плеохроирует от бледно-зеленого до голубовато-зеленого (возможно, барруазит). Хлорит образует чешуйки, сноповидные агрегаты размером до 0.5 мм, часто развивается поперек сланцеватости. Минерал плеохроирует от бледно-зеленого до зеленого, интерферирует в коричневых тонах. В породе встречаются скопления мелких изометричных зерен титанита в виде отдельных полос, развиваются зерна магнетита (октаэдри) размером до 1 мм, которые в сечении принимают треугольную и четырехугольную формы. С магнетитом ассоциируются скопления зерен карбоната. Породу прорывает прожилок мощностью около 2 мм магнетит-кварц-клиноцоизитового состава. По взаимоотношениям минералов можно утверждать, что кварц и хлорит, а возможно клиноцоизит и магнетит, являются вторичными по отношению к амфиболу и альбиту.

Кварц-хлорит-мусковит-глаукофан-карбонатные породы имеют лепидонематогранобластовую, средне- и крупнозернистую порфиробластовую структуру, неравномерную сланцеватую или массивную текстуру. Порода состоит (об. %) из амфибола (глаукофан) (20–30), альбита (0–2), хлорита (10), мусковита (5–10), карбоната (20–50), рутила (1), ильменита и магнетита (1–2).

В породе развиваются крупные порфиробласты карбоната размером до 1 см, между которыми наблюдаются мелкие зерна (до 1 мм) глаукофана, кварца, хлорита и мусковита. В карбонате присутствуют включения кварца, глаукофана, мусковита. Зеленый хлорит образует чешуйки размером до 2 мм, интерферирует в серо-зеленых тонах. Призматический и длиннопризматический глаукофан плеохроирует от бледно-зеленого до бледно-фиолетового. Кварц и альбит образуют удлиненные, неправильной формы зерна размером до 1.5 мм. В кварце иногда наблюдается неравномерное погасание, полосы излома. Рутил развивается, по-видимому, вокруг ильменита. Рудные минералы размером 0.1 мм в сечении имеют сложные четырехугольные формы.

Из петрографического описания следует, что различные по составу кристаллические сланцы в разной степени подверглись вторичным изменениям. В процессе окварцевания, хлоритизации, эпидотизации и карбонатизации в сланцах развиваются рудные минералы — ильменит, магнетит и сульфиды.

Петрохимические особенности сланцев неркаюского комплекса

Для разделения сланцев на пара- и ортопороды была применена диаграмма А. Нематова, в которой использовались данные химического состава пород, представленные в таблице 1. На диаграмме А. Нематова преобладающее большинство фигуративных точек составов гранатсодержащих и гранатовых кварц-клиноцоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовых сланцев и гранат-мусковитовых гнейсоподобных пород попадают в область паропород (рис. 3). Подтверждают первичную осадочную природу этой группы сланцев данные дискриминантной функции $DF(x)$ (Великославинский и др., 2013), значения которой находятся в пределах 0.35–1.74, и результаты анализа литохимических особенностей. На классификационной диаграмме М. Хиррона большая часть образцов попадает в область глинистых пород (рис. 4). Гранат-мусковитовые гнейсоподобные породы обнаруживают схожесть с железистыми песчаниками (единичные образцы находятся в поле литита и вакка). Выводы о первично-осадочном происхождении кристаллических сланцев были получены в работах предшественников (Пыстин и др., 1994; Ремизов и др., 2006; Кушманова, 2020).

Несколько фигуративных точек кварц-хлорит-мусковит-глаукофан-карбонатного и кварц-клиноцоизит-хлорит-амфибол-альбитового состава пород проецируются в поле ортопород (рис. 3). Для реконструкции их первичного состава была построена диаграмма TAS, на которой фигуративные точки химического состава амфиболовых (глаукофановых) сланцев попадают в поле базальтов (габбро) либо располагаются в области субщелочных габброидов (рис. 5).

Петрофизические группы сланцев неркаюского комплекса

Результаты совместного анализа плотности, зависящего от вещественного состава пород, их текстурно-структурных особенностей, и магнитной восприимчивости, обусловленной образованием ферромагнитных минералов при вторичных (наложенных) процессах, представлены в таблице 2. В процессе группирования по петроплотностным и петромагнитным параметрам кристаллические сланцы разделились на четыре петрофизические группы (Пономарева, Кушманова, 2024). Каждая выделенная петрогруппа отличается количественно-минеральным составом и пределами вариаций плотности и удельной магнитной восприимчивости. Наиболее детально распределение физических параметров представлено на гистограммах и вариационных кривых распределения (рис. 6).

У кристаллических сланцев наблюдаются широкие диапазоны изменения как плотности ($2.62–3.02 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ (рис. 6, а), так и удельной магнитной

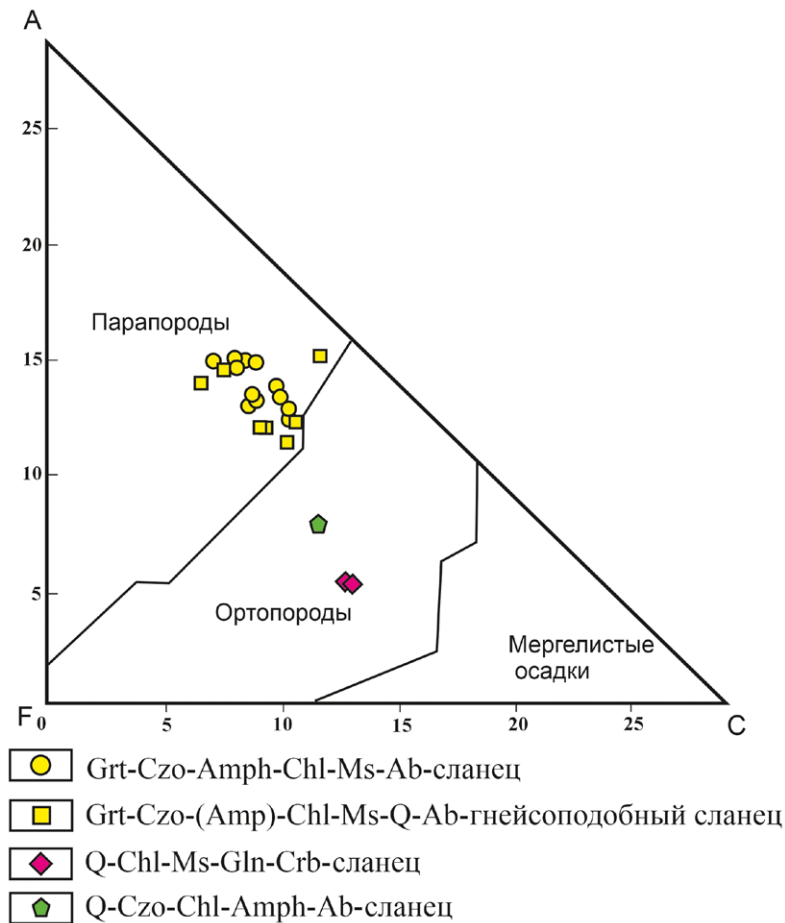


Рис. 3. Диаграмма для разделения пара- и ортопород по А. Нематову (Ефремова, Стафеев, 1985): Grt — гранат, Czo — клинозоизит, Amp — амфибол, Chl — хлорит, Ms — мусковит, Ab — альбит, Q — кварц, Gln — глаукофан, Crb — карбонат, Ep — эпидот

Fig. 3. Diagram for separating para- and ortho-rocks according to A. Nematov (Efremova, Stafeev, 1985): Grt — garnet, Czo — clinozoisite, Amp — amphibole, Chl — chlorite, Ms — muscovite, Ab — albite, Q — quartz, Gln — glaucophane, Crb — carbonate, Ep — epidote

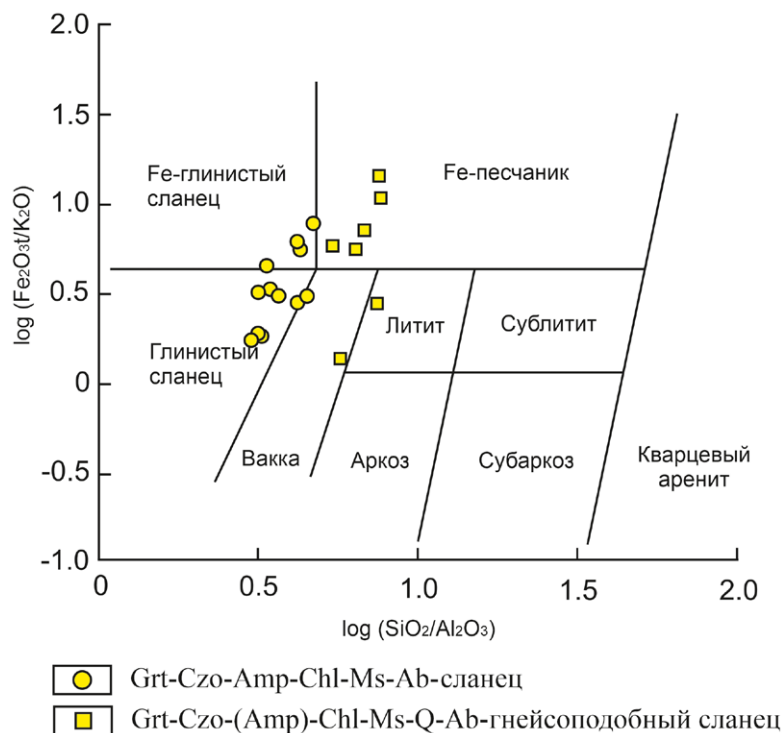


Рис. 4. Классификационная диаграмма М. Хиррона (Herron, 1988)

Fig. 4. Classification diagram by M. Herron (Herron, 1988)

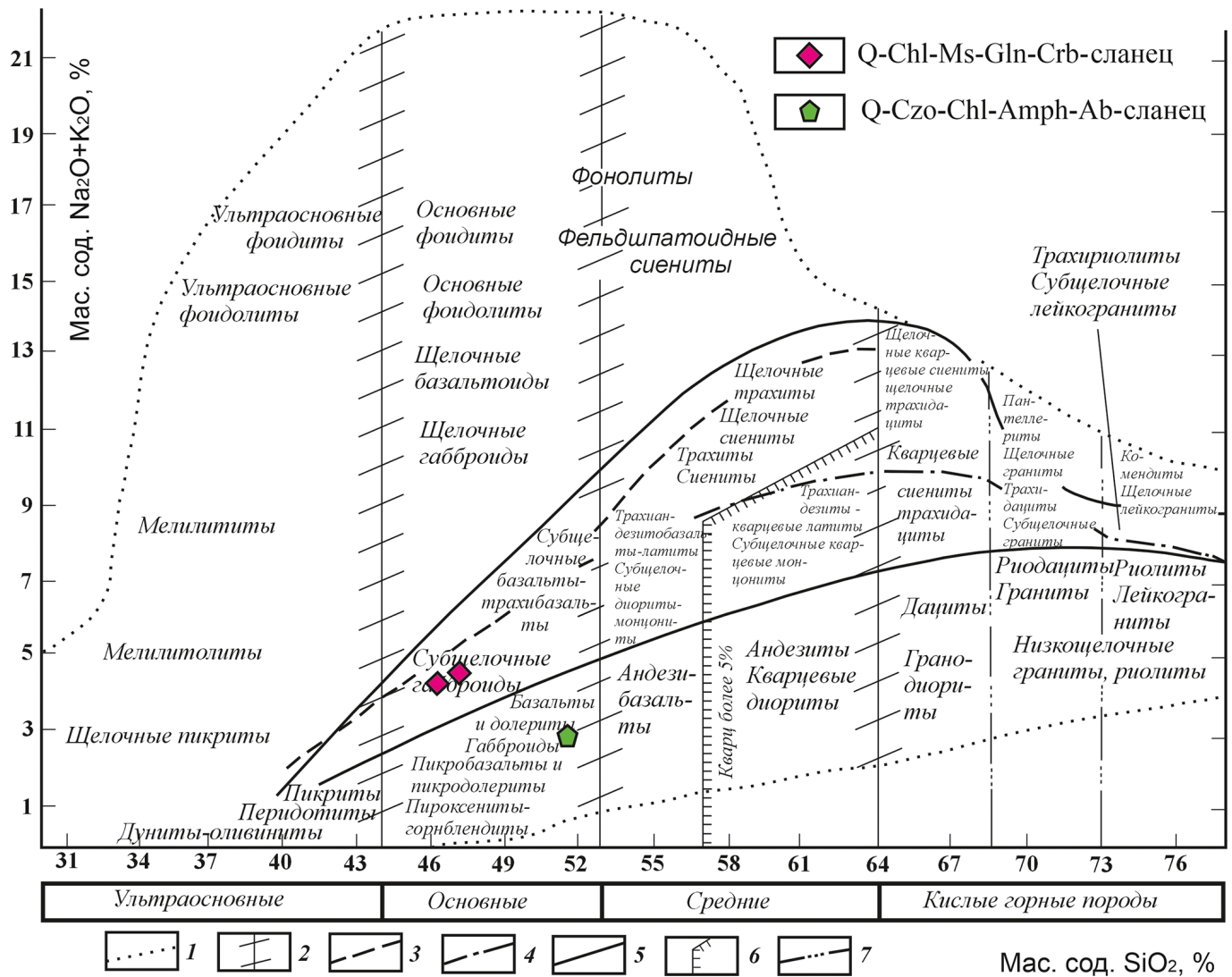


Рис. 5. Положение фигуративных точек ортопород неркаюского комплекса на диаграмме TAS (Классификация..., 1997)

Fig. 5. Position of figurative points of orthorocks of the Nerkey complex on the TAS diagram (Classification..., 1997)

Таблица 2. Петрофизические характеристики кристаллических сланцев неркаюского комплекса

Table 2. Petrophysical characteristics of crystalline schists of the Nerkey complex

Петрофизические характеристики пород / Petrophysical characteristics of the rocks					
Петроплотностные группы Petrodensity groups	Немагнитные / Non-magnetic			Магнитные / Magnetic	
	I	a	$\rho < 2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\chi < 100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$	b	$\rho < 2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\chi > 100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$
	II	c	$2.78 < \rho < 3.00 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\chi < 100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$	d	$\rho \geq 2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\chi > 100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$

восприимчивости $(10-2880) \times 10^{-8} \text{ СИ}$ (рис. 6, b). Статистические характеристики распределения плотности ($M_o - 2.71$, $M_e - 2.74$, $\eta - 2.76$, $A_s - 1$) и удельной магнитной восприимчивости ($M_o - 15.84$; $M_e - 20.75$; $\eta - 86.6$, $A_s - 1.3$) имеют сложную форму вариационных кривых со случайными флуктуациями и положительную правостороннюю асимметрию на обоих графиках. На рис. 6 плотностной максимум, заключенный в пределах $(2.72-2.77) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, составляя гранатосодержащие и гранатовые кварц-клиноцоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы

(табл. 2, Ia). Магнетит в этих кристаллических сланцах практически не встречается или встречается редко в виде мелких зерен размером до 0.1 мм, поэтому сланцы немагнитны. Для них характерен очень узкий диапазон изменения магнитной восприимчивости, заключенный в интервале $(10-56) \times 10^{-8} \text{ СИ}$ (рис. 6, b). Среди сланцев осадочного происхождения встречаются магнитные разности (табл. 2, Ib). Развитие магнитных рудных минералов подтверждается ростом значений $\chi_{\text{уд}}$ свыше $100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$ и может варьировать в пределах $(148-240) \times 10^{-8} \text{ СИ}$. В процессе замещения

высокоплотных минералов (амфибол) на минералы с низкоплотностными свойствами (кварц, хлорит) плотность сланцев остается постоянной благодаря образованию рудных минералов, таких как рутил, титаномagnetит, магнетит (нк-106, нк-104, нк-201). Важно отметить, что кварц (в большей степени) и хлорит являются наложенными минералами по отношению к другим породообразующим составляющим.

Немагнитную петрогруппу также представляют гранат-мусковитовые гнейсоподобные сланцы с хлоритом (или без хлорита) (табл. 2, Пс). Анализ минерального состава гнейсоподобных сланцев показал, что породы, состоящие в основном из кварца, альбита, мусковита, хлорита и граната, практически не содержат ферромагнетиков. В незначительных количествах в качестве рудного минерала у них выступает ильменит. Показатели удельной магнитной восприимчивости соответствуют значениям существенно меньшим, чем 100×10^{-8} СИ. Но в отличие от вышеописанных кристаллических сланцев гнейсоподобные сланцы имеют повышенные плотности. На рис. 6 пределы вариаций плотности варьируют в интервале $2.78 < \rho < 3.00 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Отдельную петрогруппу составляют самые высокоплотные и магнитные сланцы кварц-клиноцоизит-хлорит-амфибол-альбитового и кварц-хлорит-мусковит-глаукофан-карбонатного состава (табл. 2, Пд). На гистограмме плотности амфиболовые (глаукофановые) сланцы имеют значения плотности $(2.92-2.97) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ (рис. 6, а). Намагниченность этих пород превышает

100×10^{-8} СИ и меняется в пределах от $(286-378) \times 10^{-8}$ СИ и более (рис 6, б), а плотность варьирует в пределах $2.78 < \rho \leq 3.00 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ [9]. Аномально высокими магнитными свойствами отличаются хлоритизированные, окварцованные и эпидотизированные амфиболовые сланцы, в которых обнаружены самые высокие содержания до (5 %) крупнозернистого магнетита (рис. 2, g, h). В этих частично или полностью перекристаллизованных амфиболитах $\chi_{\text{уд}}$ увеличивается до 2866×10^{-8} СИ.

При анализе петроплотностных характеристик парапород отмечаются значительно меньшие плотности у сланцев с мелко- и среднезернистой структурой и сланцеватой (табл. 2, Ia), очковой и гнейсовидной текстурой (табл. 2, Пс). Кроме того, на понижение плотности парапород в определенной степени может влиять мусковит, развивающийся между зернами кварца и альбита по направлению сланцеватости (нк-14, нк-16, нк-16-3). Ортопороды со средне- и крупнозернистой структурой, слабо сланцеватой и массивной текстурой (табл. 2, Пд) характеризуются наибольшей плотностью (нк-202, н-182-3, нк-203). На диаграмме зависимости плотности от содержания основных породообразующих оксидов выяснилось, что плотность кристаллических сланцев при $r = 0.45$ имеет слабую связь с суммой оксидов железа, магния, калия и кальция на всем интервале изменений (рис. 7, а). Обратная зависимость между плотностью и содержанием кремнезема ($r = -0.8$) (рис. 7, б) также указывает на то, что плотность кристаллических сланцев в меньшей степени

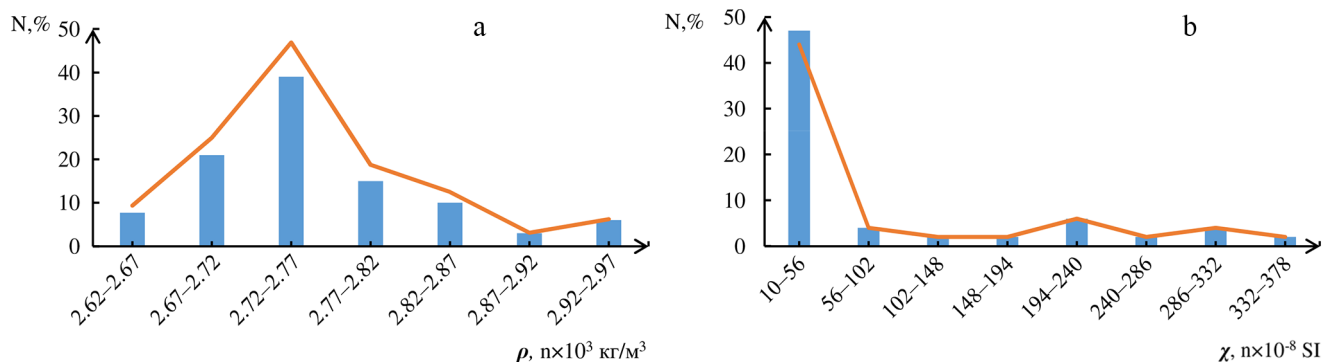


Рис. 6. Гистограммы и вариационные кривые плотности (а) и намагнитченности (б) кристаллических сланцев неркаюского комплекса

Fig. 6. Histograms and variation curves of density (a) and magnetization (b) of crystalline schists of the Nerkayu complex

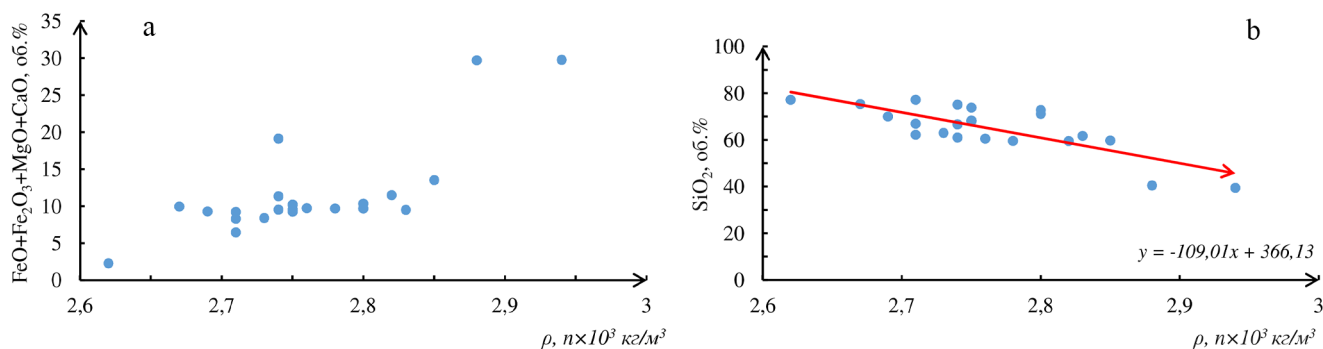


Рис. 7. Диаграммы зависимости изменения плотности сланцев от содержания оксидов: а — $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO}$; б — SiO_2

Fig. 7. Diagrams of the dependence of changes in schist's density on the content of oxides: а — $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO}$; б — SiO_2



зависит от содержаний SiO_2 (менее 50–55 %) в породах (табл. 1).

Приведенные данные показывают, что плотностные характеристики изучаемых пород, претерпевших изменения при низко- и среднетемпературных метаморфических процессах, хорошо коррелируются с их первичным составом и структурно-текстурными особенностями. Сильно рассланцованные гранатсодержащие и гранатоподобные кварц-клинозоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы с гранолепидобластовой структурой, образовавшиеся по глинистым породам, имеют пониженную плотность. Гнейсоподобные породы с лепидогранобластовой структурой, протолитами которых были песчаники, а также апобазальтовые, преимущественно амфиболовые сланцы с немагнитногранобластовой структурой имеют повышенную плотность.

Выводы

В процессе проведенного петрофизического группирования сланцевых пород неркаюского комплекса выделены четыре группы сланцев, отличающиеся вещественным составом, физическими параметрами и генезисом.

Петроплотностные характеристики пара- и ортосланцев определяются минеральным составом и плотностью исходных пород (субстрата). Разделение по плотности проходит по условному значению $2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$.

В отличие от плотности, магнитные свойства кристаллических сланцев имеют наложенный характер и зависят от количества и размерности зерен вторичного магнетита, развивающегося в процессе диафореза. Локальный характер распределения магнетита в породах позволил выделить среди пара- и ортосланцев немагнитные (до $100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$) и магнитные (свыше $100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$) разности.

Результаты комплексного подхода в изучении физических свойств сланцевых пород неркаюского комплекса, на наш взгляд, являются ценным материалом при решении задач петрофизического районирования и для построения надежных геолого-геофизических глубинных моделей.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ ГР 122040600012-2).

Авторы выражают благодарность кандидату геолого-минералогических наук Н. С. Уляшевой за ряд существенных разъяснений по петрографии и петрохимии.

Литература / References

- Вализер П. М., Ленных В. И. Амфиболы голубых сланцев Урала. М.: Наука, 1988. 203 с.
- Valizer P. M., Lennyh V. I. Amphiboles of the blue schists of the Urals. Moscow: Nauka, 1988, 203 p. (in Russian)
- Великославинский С. Д., Глебовицкий В. А., Крылов Д. П. Разделение силикатных осадочных и магматических пород по содержанию петрогенных элементов с помощью дискриминантного анализа // ДАН. 2013. Т. 453. № 3. С. 310–313.
- Velikoslavinsky S. D., Glebovitsky V. A., Krylov D. P. Separation of silicate sedimentary and igneous rocks by the content of major elements using discriminant analysis. Doklady Earth Sciences, 2013, No. 453(3), pp. 310–313. (in Russian)
- Дементьев Л. Ф., Жданов М. А., Кирсанов А. Н. Применение математической статистики в нефтегазопромышленной геологии. М.: Недра, 1977. 255 с.
- Dementyev L. F., Zhdanov M. A., Kirsanov A. N. Application of mathematical statistics in oil and gas geology. Moscow: Nedra, 1977, 255 p. (in Russian)
- Ефремова С. В., Стафеев К. Г. Петрохимические методы исследования горных пород. М.: Недра, 1985. 512 с.
- Efremova S. V., Stafeev K. G. Petrochemical methods for studying rocks. Moscow: Nedra, 1985, 512 p. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q-41 — Воркута. Объяснительная записка / Отв. исп. М. А. Шишкин, Я. Э. Файвусович, А. П. Астапов, А. С. Воронин, Е. В. Молчанова. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Ural series. Sheets Q-41 — Vorkuta. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI map plant, 2007, 541 p. (in Russian)
- Григорьев С. И., Ремизов Д. Н., Григорьева Н. Г., Юдин В. В., Феофилактов Ф. Н. Термодинамические условия формирования метаморфических пород Неркаюского и Лемвинского аллохтонов на Приполярном Урале // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана: Сб. ст. Сыктывкар, 2005. Вып. 119. С. 53–64. (Тр. ИГ Коми НЦ УрО РАН.)
- Grigor'ev S. I., Remizov D. N., Grigor'eva N. G., Judin V. V., Feofilaktov F. N. Thermodynamic conditions for the formation of metamorphic rocks of the Nerkayu and Lemvinsky allochthons in the Subpolar Urals. Collection of articles: Petrology and mineralogy of the north of the Urals and Timan. V. 119, Syktyvkar, 2005, pp. 53–64. (in Russian)
- Иванов К. С., Пучков В. Н., Пелевин И. А. Эклогиты и глаукофановые сланцы района реки Балбанью (Приполярный Урал) // Ежегодник. 1980: УНЦ АН СССР. Свердловск, 1981. С. 72–75.
- Ivanov K. S., Puchkov V. N., Pelevin I. A. Eclogites and glaucophane schists of the Balbanyu River region (Polar Urals). Yearbook-1980, Sverdlovsk, USC USSR AS, 1981, pp. 72–75. (in Russian)
- Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов (Рекомендации Подкомиссии по систематике изверженных пород Международного союза геологических наук). М.: Недра, 1997. 247 с.
- Classification of igneous (igneous) rocks and glossary of terms (Recommendations of the Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks of the International Union of Geological Sciences). Moscow: Nedra, 1997, 247 p. (in Russian)
- Кушманова Е. В. Состав и геодинамические условия формирования кристаллических сланцев неркаюского экологит-сланцевого комплекса (Приполярный Урал) // Материалы ЛII Тектонического совещания. 2020. Т. 2. С. 13–16.
- Kushmanova E. V. Composition and geodynamic conditions for the formation of crystalline schists of the Nerkayus eclogite-schist complex (Subpolar Urals). Proc. of the 70th Tectonic conference, Moscow: GEOS, V. 2, 2020, pp. 13–16. (in Russian)



- Методические рекомендации по интерпретации геофизических данных при крупномасштабном геологическом картировании / Отв. исп. Е. М. Ананьева, Е. Б. Гороневич и др. Свердловск: Изд-во УГЦЭ, 1983. 301 с. Methodological recommendations for the interpretation of geo-physical data in large-scale geological mapping. Sverdlovsk: Uralgeologiya, 1983, 301 p. (in Russian))
- Пономарева Т. А., Кушманова Е. В. Метабазиты неркаюского комплекса Приполярного Урала: петрофизика, петрография и петрохимия // Вестник ВГУ. Серия: Геология. № 4. 2022. С. 84–94. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/84-94>
Ponomareva T. A., Kushmanova E. V. Metabasites of the Nerkayu Complex of the Subpolar Urals: petrophysics, petrography and petrochemistry. Vestnik VSU, Series: Geology, No. 4, 2022, pp. 84–94. (in Russian)
- Пономарева Т. А., Кушманова Е. В. Петрофизические и петрографические исследования сланцев северной части неркаюского комплекса Приполярного Урала / Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVIII Геологического съезда РК. Сыктывкар, 2024. С. 59–62.
Ponomareva T. A., Kushmanova E. V. Petrophysical and petrographic studies of shales in the northern part of the Nerka-Yu complex of the Subpolar Urals. Proc. of the 18th Geological Congress of the Komi Republic. Syktyvkar: Geoprint, 2024, pp. 59–62. (in Russian)
- Пономарева Т. А., Пыстин А. М. Петрофизическая характеристика пород полиметаморфических комплексов севера Урала // Известия Коми НЦ УрО РАН, 2014. № 2(18). С. 68–74.
Ponomareva T. A., Pystin A. M. Petrophysical characteristics of polymetamorphic rock complexes of the north of the Urals). Proceedings of the Komi Science Centre, 2014, No. 2 (18), pp. 68–74. (in Russian)
- Пономарева Т. А., Пыстин А. М. Анализ физических свойств пород Восточной зоны севера Урала // Известия Коми НЦ УрО РАН, 2016. №1(25). С. 51–61.
Ponomareva T. A., Pystin A. M. Analysis of the physical properties of rocks of the eastern zone of the northern Urals. Proceedings of the Komi Science Centre, 2016, No. 1(25), pp. 51–61.
- Пучков В. Н., Карстен Л. А., Иванов К. С. Состав и тектоническое положение эклогит-глаукофансланцевых комплексов Приполярного Урала // ДАН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 676–680.
Puchkov V. N., Karsten L. A., Ivanov K. S. Composition and tectonic position of eclogite-glaucophane complexes of the Circumpolar Urals. Doklady Earth Sciences, 1983, V. 271(3), pp. 676–680. (in Russian)
- Пучков В. Н., Карстен Л. А., Шмелев В. Р. Важнейшие черты геологического строения восточного склона Приполярного Урала // Геология и палеонтология Урала. Свердловск, 1986. С. 75–88.
Puchkov V. N., Karsten L. A., Shmelev V. R. The most important features of the geological structure of the eastern slope of the Nether-Polar Urals. Geology and Paleontology of the Urals. Sverdlovsk, 1986, pp. 75–88. (in Russian)
- Пыстин А. М., Казак А. П., Чернышев Ю. А. Эклогиты неркаюского комплекса на Приполярном Урале // Записки ВМО. 1983. Ч. 112. Вып. 3. С. 346–353.
Pystin A. M., Kazak A. P., Chernyshev Yu. M. M., Kazak A. P. Eclogites of the Nerkayu complex in the Nether-Polar Urals. RMC Proc., 1983, V. 112, No. 3, pp. 346–353. (in Russian)
- Пыстин А. М., Чернышев Ю. А., Царев Ю. М. О проявлении эклогитового метаморфизма на Приполярном Урале // Ежегодник-1979 Института геологии и геохимии. УНЦ АН СССР. Свердловск, 1980. С. 79–81.
Pystin A. M., Chernyshev Yu. M., Tsarev Yu. M. On the manifestation of eclogite metamorphism in the Subpolar Urals. Yearbook-1979 of the Institute of Geology and Geochemistry, 1980, USC USSR AS, Sverdlovsk, P. 79–81. (in Russian)
- Пыстин А. М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб: Наука, 1994. 208 с.
Pystin A. M. Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals. Saint Petersburg: Nauka, 1994, 208 p. (in Russian)
- Ремизов Д. Н., Григорьев С. И., Григорьева Н. Г., Юдин В. В., Иванов В. Н., Феофилактов Ф. Н. Первичный состав и геодинамика неркаюского комплекса и лемвинского аллохтона Приполярного Урала // Проблемы геологии и минералогии. 2006. С. 128–142.
Remizov D. N., Grigor'ev S. I., Grigor'eva N. G., Judin V. V., Ivanov V. N., Feofilaktov F. N. Primary composition and geodynamics of the Nerkayu complex and Lemva allochthons of the Nether-Polar Urals. Problems of Geology and Mineralogy. Syktyvkar: Geoprint, 2006, pp. 128–142. (in Russian)
- Gómez-Pugnaire M. T., Karsten L., Lopez Sánchez-Vizcaíno V. Phase relationships and P-T conditions eclogite-blue-schists and their transformation to greenschist facies rocks in Nerkayu complex (Northern Urals) // Tectonophysics. 1997. Vol. 276. P. 195–216. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00055-3)
- Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // Journal of Sedimentary Petrology. 1988. No. 58. P. 820–829.
- Stuart A., Ord K. Kendall's Advanced Theory of Statistics. London: Edward Arnold. 1994. 704 p.

Поступила в редакцию / Received 05.11.2024

Обзор подводных курильщиков Срединно-Атлантического хребта

И. Г. Добрецова

АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербург, Россия
dobro54@mail.ru

Видеонаблюдения и опробование дна Атлантического океана на Срединном хребте позволили выявить помимо известных чёрных и белых курильщиков неизвестные ранее зелёные, зеленовато-белые и оранжевые. Кроме того, выявлено многообразие минерального состава белых курильщиков. Показаны связь курильщиков с процессами дегазации и осадками, гидротермально-бактериальный генезис курильщиков.

Ключевые слова: Срединно-Атлантический хребет, курильщики, глубоководные полиметаллические сульфиды, дегазация

Review of underwater smokers on the Mid-Atlantic Ridge

I. G. Dobretsova

Polar Marine Geological Exploration Expedition, St. Petersburg, Russia

Video observations and sampling of the Atlantic Ocean floor on the Mid-Atlantic Ridge have revealed previously unknown green, greenish-white and orange smokers in addition to the well-known black and white ones. Besides, a variety of mineral compositions has been revealed among the white smokers. The connection between smokers and degassing processes and sediments, as well as their hydrothermal-bacterial genesis, has been shown.

Keywords: Mid-Atlantic Ridge, smokers, deep-sea polymetallic sulfides, degassing

Введение

Наиболее известными видами активных гидротермальных образований на дне океанов, получивших название «курильщики», являются так называемые чёрные курильщики — придонные глубоководные постройки, обогащенные медноколчеданными и полиметаллическими сульфидными (ГПС). Такого же рода постройки, часто без наложенных сульфидных минералов — «белые курильщики» — имеют на дне океанов более ограниченное распространение, образуясь при меньших температурах и локализуясь на меньших глубинах.

АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» (ПМГРЭ) более 30 лет ведёт исследования вулcano-гидротермальных образований на Срединном Атлантическом хребте (САХ), включая поиски и оценку глубоководных полиметаллических сульфидов (Силаев и др., 2022). С 2012 г. работы были сосредоточены в пределах Российского разведочного района (РРР) САХ в координатах от 20 до 13° с. ш. (рис. 1).

Объекты и методы исследования

К основным методам поисков гидротермальных проявлений на дне САХ, которые использовались во время рейсов научно-исследовательских судов «Профессор Логачев» и «Янтарь» с 2004 по 2023 год, относятся следующие: 1) видеонаблюдение дна с помощью специально оборудованных видеокамер (устройство для буксирования видео- и фотокамер над дном разработаны в ПМГРЭ); 2) гидрофизическое зондиро-

вание толщ воды с целью выявления аномалий в придонном слое воды; 3) шлихоминералогический метод поиска гидротермальных образований по минералам-индикаторам гидротермальной деятельности в биогенных карбонатных осадках (методика разработана автором); 4) геофизические методы поиска с помощью гидролокатора бокового обзора «МАК-1М», оснащён-

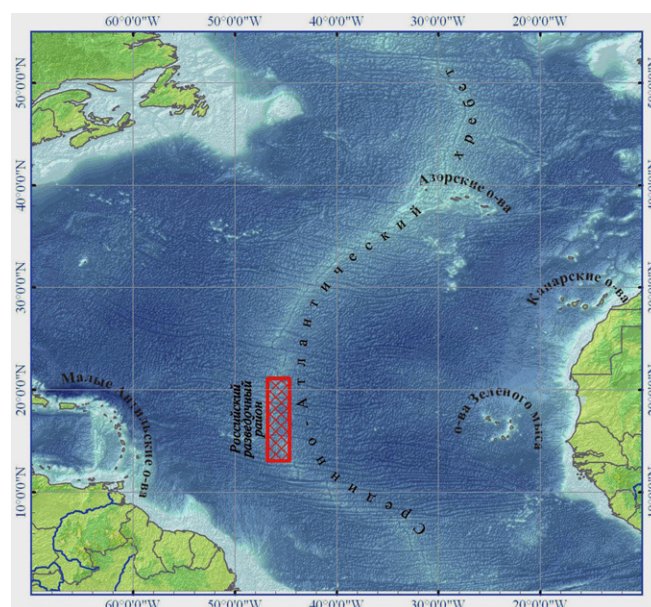


Рис. 1. Схема расположения Российского разведочного района в Атлантическом океане

Fig. 1. Map of the location of the Russian exploration area in the Atlantic Ocean

ного измерителем естественного электрического поля (ЕП) (оборудование для измерения ЕП сделано сотрудниками ПМГРЭ, оригинальная методика обработки геофизических данных разработана в ПМГРЭ). Выявленные с помощью вышеперечисленных методов гидротермальные объекты поднимались на борт судов с помощью грейфера, оборудованного телекамерой (точечный отбор вещества с площади 1 м²), драги (донно-каменный материал собирался с трека длиной в 300 м), коробчатый пробоотборника (точечный отбор осадков с площади 40 × 40 см) (рис. 2) и руки-манипулятора необитаемого подводного аппарата.

Вещественный состав поднятого материала подробно изучался и описывался на борту судна. При этом помимо чисто визуальных определений применялись оптические методы определения (в частности, иммерсионный метод) а также микрохимические реакции. В стационарных условиях при камеральной обработке полученного вещества применялись различные методы определения химического состава (атомно-эмиссионный с индуктивно связанной плазмой, масс-спектральный с индуктивно связанной плазмой, ИК-спектроскопия, силикатный анализ, кулонометрический метод), рентгенофазовый анализ для получения минерального состава, изучение аншлифов и прозрачно-полированных шлифов оптическими методами и под электронным микроскопом. Таким образом, были выявлены и подняты трубы разнообразных по цвету и минеральному составу курильщиков.

Геологическая позиция

В пределах РРР дно океана сложено базальтами, в том числе и молодых вулканов. Среди базальтов отмечаются локальные выходы ультраосновных пород габбро-перидотитового ряда и подводные горы офиолитового комплекса. При этом в бортах рифтовой долины выходы коренных пород перекрыты рыхлыми биогенными карбонатными осадками небольшой мощности — от первых десятков сантиметров до первых метров, в отдельных западинах до 20 м. Участки, ли-

шённые осадков в бортах рифтовой долины, практически не наблюдаются. Но и в самом днище долины также отмечены осадки небольшой мощности, как правило не превышающие 50 см. Рудные поля, выявленные в пределах РРР САХ, связаны как с подстилающими базальтами, так и ультраосновными породами. Разнообразные курильщики были подняты с рудных полей, а также с участков вне рудных полей.

Результаты исследования

В отличие от устоявшегося мнения, часто публикуемого в статьях, проведенные автором исследования показали, что гидротермальные постройки САХ приурочены не к осевому поднятию днища рифтовой долины, и даже не к самому ее днищу, а к бортам. Именно здесь, в бортах, и расположены 13 рудных полей, открытые специалистами ПМГРЭ. Исключением является 14-е рудное поле, выявленное в кальдере одноимённого вулкана Пюи де Фоль. Этот вулкан высотой около 1 км находится в днище рифтовой долины на широте 20°30' с. ш. и является более молодой структурой по отношению к днищу.

Исследования вещественного состава гидротермальных построек (автор) и дыма флюидов (институт «Океанологии» им. П. П. Ширшова и зарубежные исследователи) выявили в них микроорганизмы, которые также принимают активное участие в процессах образования построек курильщиков на дне океанов.

Изучение образцов под электронным микроскопом показало присутствие как самих фоссилизированных бактерий в сульфидах и гидроксидно-железистых метасоматитах рудных полей САХ, так и большого разнообразия бактериоморфных форм выделений среди сульфидов, сульфатов и гидроксидов железа и марганца. Ещё одним доказательством участия бактерий в гидротермальном процессе служит видеосъёмка активных чёрных курильщиков рудного поля Пюи де Фоль, на которой видно, как краб на стенке активной сульфидной постройки сидит в чёрном дыму и собирает на своём хитиновом покрове бактериальный мат



Рис. 2. Аппаратура для подъёма вещества со дна: а — коробчатый пробоотборник; б — скальная драга; с — грейфер с видеокamerой

Fig. 2. Equipment for lifting substances from the bottom: a — box sampler; b — rock dredge; c — grab with video camera

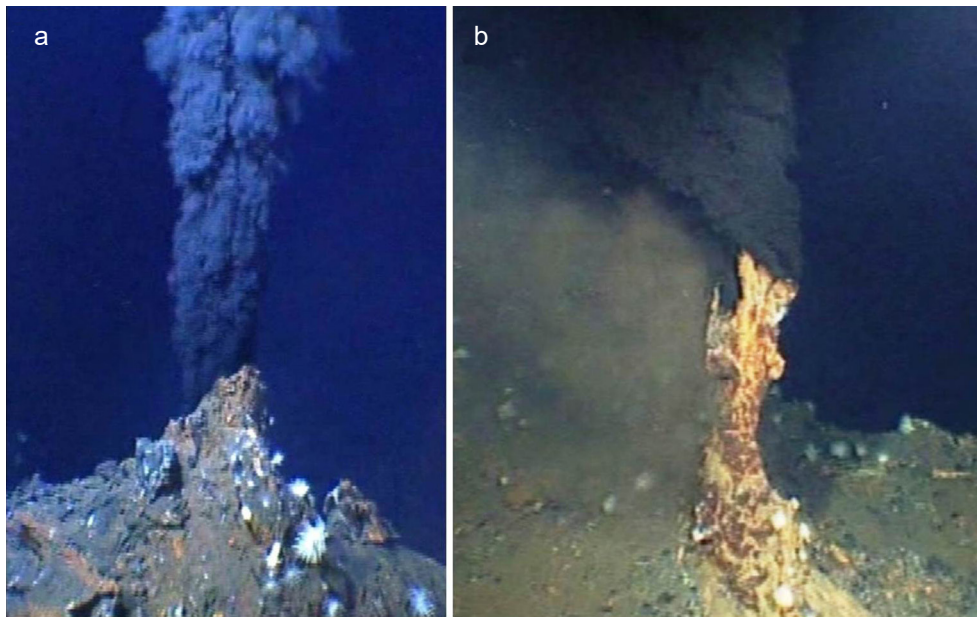


Рис. 3. Начальная стадия формирования (а) и окончательный вид (б) активной трубы черного курильщика. Стоп-кадры видеосъёмки на рудном поле Ашадзе-1 в ходе российско-французской экспедиции Serpentine, 2007

Fig. 3. Initial stage of formation (a) and final appearance (b) of the active chimney of a black smoker. Still frames from video filming at the Ashadze 1 ore field during the Russian-French Serpentine expedition, 2007

волоконистой структуры. Таким образом, минеральные новообразования курильщиков имеют бактериально-гидротермальный генезис.

Чёрные курильщики в форме труб впервые были обнаружены в 1977 г. при погружениях батискафа «Алвин» в Тихом океане. Позднее их выявили в Атлантическом и Индийском океанах, а также в Карибском море на глубинах от 1 до 5 км. Своё название они получили благодаря чёрному цвету флюида, выходящего в воду и напоминающего дым (рис. 3). Температура флюида на выходе может достигать 350–420 °С, а pH составляет 2–3. Трубы чёрных курильщиков сложены преимущественно сульфидами — пиритом (FeS_2), марказитом (FeS_2), изокубанитом (CuFe_2S_3), халькопиритом (CuFeS_2), борнитом (Cu_5FeS_4), минералами ряда «халькозин–ковеллин» (Cu_{1-x}S), сфалеритом и/или вюртцитом (ZnS). В качестве примеси выявлены сульфаты и самородные металлы (медь, золото, серебро).

Если рассматривать рудные поля как источник полезного ископаемого — глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС), то доля труб в них невероятно мала, не составляет даже 1 %, и трубы отмечены не на каждом рудном поле. Это первый важный факт. Точный подсчёт количества труб проведён пока только для 5 рудных полей, по остальным рудным полям статистика будет представлена в процессе подробного их изучения с помощью современной аппаратуры.

Вторым важным фактом является приуроченность ГПС не к осевому поднятию, и даже не к днищу рифтовой долины, а к бортам, где как раз и расположены найденные на сегодняшний день рудные объекты РРР САХ. Исключением, пожалуй, является рудное поле в кальдере одноимённого вулкана Пюи де Фоль. Срединный Атлантический хребет удалён на значительное расстояние от берегов, и до него не доходит обломочный материал из речных стоков. В его пределах накапливаются только пелагические биогенные карбонат-

ные осадки (БКО). Поскольку Атлантический хребет относится к медленнораспрединговому типу, то теоретически считается, что в днище долины осадков нет. Тем не менее и в днище, и в кальдере вулкана Пюи де Фоль (который является более молодой структурой по отношению к днищу долины), мы их наблюдаем практически повсеместно. А в бортах рифтовой долины участки, лишённые осадков, редки.

Независимо от того, с какими подстилающими породами связаны рудные поля, неперенным условием существования гидротермальных образований являются осадки, а не подстилающие породы. Именно связь пелагических осадков с сульфидами является ещё одной характерной особенностью гидротермальных рудных полей, что является третьим важным фактом. Практический опыт наблюдений показал, что там, где нет осадков, хотя и проявлена гидротермальная активность в виде выходящих в воду флюидов и наблюдаются характерные «оазисы жизни» в виде скоплений специфической гидротермальной фауны и бактериальных матов, сульфидные руды отсутствуют (рис. 4, 5). Более того, за более 20 лет работы на САХ, ни разу телегрейфером не были подняты сульфидные руды без вмещающих осадков.

Флюид — это пневматолитовое глубинное образование, температура которого на выходе может достигать 350–420 °С, а pH составляет 2–3 единицы. Из него и отлагаются сульфиды, находящиеся во взвеси. Кроме того, во флюиде содержится значительное количество сероводорода, водорода и метана, концентрации которых в океанской воде очень низки (Богданов, 2006). В настоящее время считается, что упомянутый выше флюид — это морская вода, проникшая вглубь по трещинам в вулканиках, нагретая вблизи магматической камеры до критического состояния и обогащенная химическими элементами, выщелоченными из глубинных магматических пород. Однако работами Г. И. Арсановой показано, что океанская вода не может

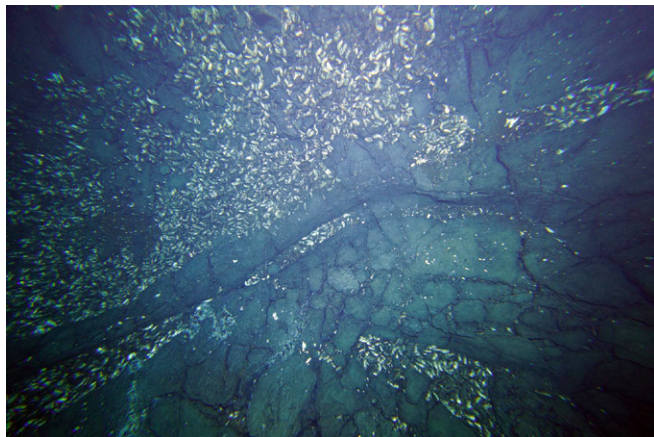


Рис. 4. Скопление типичной гидротермальной фауны (двустворчатых моллюсков) на базальтах, практически лишённых осадков. Кальдера вулкана Пюи де Фоль. Фотопрофиль 45L024t

Fig. 4. Accumulation of typical hydrothermal fauna (bivalves) on basalts, almost devoid of sediments. Puy de Fol volcano caldera. Photoprofile 45L024t

проникать вглубь, это противоречит законам физики (Арсанова, 2012; 2020). В своих работах она привела доказательства того, что выходящие на поверхность океанического дна флюиды имеют непосредственно вулканическое происхождение, образуясь вследствие дегазации планетных недр. Это подтверждается и данными Ю. А. Богданова о значительном превышении концентрации химических элементов в составе флюидов по сравнению с морской водой. Было показано, что во флюиде концентрируются химические элементы, отсутствующие как в морской воде, так и в подвергающихся выщелачиванию горных породах.

На особое происхождение рудообразующих флюидов также указывает значительная неоднородность вещественного состава гидротермальных построек в пределах не только САХ, но и отдельных рудных полей и даже отдельных рудных тел. Нам представляется, что просто нагретая океанская вода не могла бы дать столь высокое минеральное разнообразие, наблюдающееся в придонных оруденениях. Океанская вода имеет глобально устойчивый состав, магматические породы, из которых происходило предполагаемое выщелачивание, тоже устойчивы по химическому составу, поэтому не могут обеспечить наблюдающееся разнообразие минералов. Ещё одним фактом, ставящим под сомнение идею образования рудообразующего флюида за счет нагретой океанской воды, является приуроченность рудных объектов не к оси рифтовой долины, где и находится эпицентр нагревания, а к бортам рифтовой долины, удаленным от такого эпицентра. Однако именно эти зоны особенно обогащены продуктами современной гидротермальной активности, в том числе и в виде труб курильщиков.

Из жерла сульфидной трубы может выходить не только чёрный, но и бесцветный флюид, из которого также отлагаются сульфиды, но уже другого состава и структуры. Температура такого флюида ниже, чем у флюида чёрного цвета, она варьирует от 100 до 150 °С. В таком случае образуются преимущественно сульфиды цинка и железа, но сама сульфидная постройка тем не менее называется чёрным курильщиком (рис. 6).

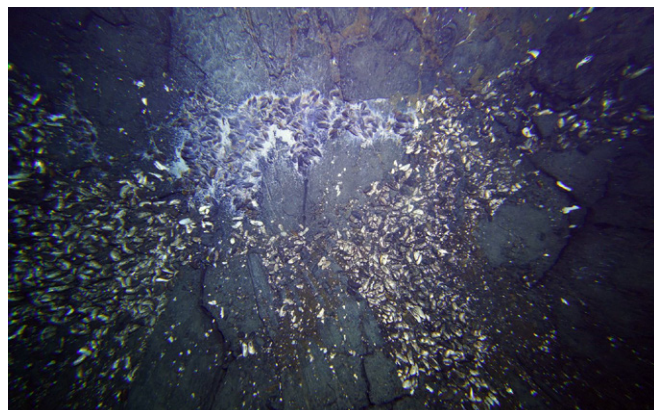


Рис. 5. Современная гидротермальная активность (муаровые высачивания). Скопление двустворчатых моллюсков и бактериальный мат (белое) на базальтах, практически лишённых осадков. Кальдера вулкана Пюи де Фоль. Фотопрофиль 45L024t

Fig. 5. Modern hydrothermal activity (moire seeps). Bivalves and bacterial mat (white) on sediment-free basalts. Puy de Fol volcano caldera. Photoprofile 45L024t

При этом, по наблюдениям Ю. А. Богданова, «дым», выходящий из одного жерла, может периодически менять свой цвет и температуру (Богданов, 2006).

Белые курильщики отличаются от чёрных не только цветом, но и физико-химическими параметрами флюида и минеральным составом новообразований. В Атлантическом океане они впервые были обнаружены в 2000 г. на расстоянии 15 км к западу от Срединно-Атлантического хребта, на глубине 750 м, где были названы рудным полем Лост Сити. Флюид белого цвета имеет температуру на выходе 40–95 °С и pH 9–9.8 единиц. Из этих дымов формировались брусит-арагонит-кальцитовые постройки разнообразной формы, в том числе трубы и колонны высотой до 60 м.



Рис. 6. Сульфидная труба и прозрачный бесцветный дым (показаны стрелками). Стоп-кадры видеосъёмки на рудном поле Ашадзе-1 в ходе российско-французской экспедиции Serpentine, 2007

Fig. 6. Sulfide pipe and transparent colorless smoke (shown by the arrow). Still frames from video filming at the Ashadze-1 ore field during the Russian-French Serpentine expedition, 2007

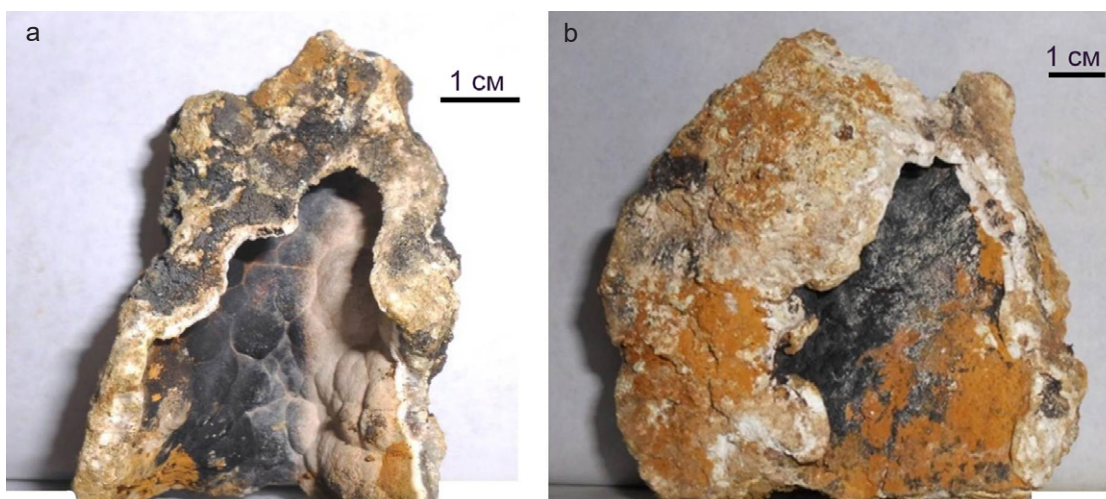


Рис. 7. Постройки белых курильщиков в виде труб с полым каналом. Передняя стенка обеих построек обломана, стенки внутренних каналов покрыты налётом вернадита (чёрное) с примесью гётита (бурое). По наружной стенке построек в виде налёта развиваются вернадит (а), гётит (б)

Fig. 7. White smoker structures in the form of pipes with a hollow channel. The front wall of both structures is broken off, the walls of the internal channels are covered with a coating of vernadite (black) with an admixture of goethite (brown). Vernadite (a) and Goethite (b) in the form of a coating, also develop on the outer wall of the structure

Описанные Ю. А. Богдановым ангидритовые постройки на гидротермальном поле ТАГ САХ также относятся к белым курильщикам. Заметим, что за более чем 30 лет исследований на САХ до этого аналогичные объекты не были найдены (Богданов, 2006).

В пределах РРР были выявлены разнообразные по минеральному составу неактивные белые курильщики. Так, на широте $17^{\circ}56'$ в восточном борту рифтовой долины установлены белые курильщики в виде построек высотой около 10 см, с полым каналом, состоящие из арагонита, кальцита и магнезиального кальцита с незначительной примесью гипса. На внутренних и наружных стенках канала отмечены вернадит и гётит в виде налёта, осевшего из дымов на заключительной стадии формирования постройки (рис. 7). Вещественный состав этих труб подтверждён рентгеновскими исследованиями.

К белым курильщикам относится и **баритовая** постройка, в состав которой включены три обломка хлоритизированного базальта (один большой — $7 \times 7 \times 5$ см — и два совсем мелких), покрытых железомарганцевыми «шубками» и корками (рис. 8). Эта постройка была поднята на южном склоне подводной горы в восточном борту рифтовой долины на широте $14^{\circ}40'$ вне рудных полей. Барит в ней сильно кавернозный и пористый, напоминает губку с большими ячейками, что более характерно для вулcano-фумарольных образований. Полости и каверны пусты. Отмечаются многочисленные флюидальные микротекстуры на внутренних поверхностях и стенках каверн. Барит диагностирован рентгенофазовым и оптическим методами.

Также к белым курильщикам относятся постройки белого цвета (с зеленоватым оттенком), имеющие тальковый, тальк-опаловый и опал-тальковый состав. В 2015 г. появилась публикация о находке глубоководных активных тальковых труб (Hodgkinson et al., 2015). Высота этих труб достигала 3 м, диаметр в основании составил 1 м. При температуре 215°C выделялся метан, осаждались тальк и кремнезём при pH раствора 5.8. Струи флюида были прозрачными, отложения таль-

ка имели светлый зеленоватый оттенок. Кроме того, были обнаружены конические холмы диаметром до 150 м и высотой до 75 м, сложенные на 85–90 % тальком. Это совершенно новый, ранее неизвестный минеральный тип придонных гидротермальных построек.

В настоящее время в пределах РРР со многих рудных полей были подняты тальковые гидротермальные постройки размером до 70 см. Тальк в них часто сопровождается минералами группы атакамита и/или гидроксидами железа и опалом, реже халькопиритом, сульфидами меди и пиритом.

На рудном поле Молодёжное в западном борту рифтовой долины были выявлены *тальк-опаловые* многоканальные постройки, фактически белые курильщики, в которых опал преобладает (рис. 9). Эти постройки насыщены фораминиферами, полностью замещёнными опалом и тальком, содержат включения свеже-



Рис. 8. Баритовая постройка, поднятая на станции 39L203g
Fig. 8. Barite structure raised at station 39L203g



Рис. 9. Многоканальная тальк-опаловая постройка. Рудное поле Молодёжное. Станция 41L159d

Fig. 9. Multichannel talc-opal structure. Molodezhnoye ore field. Station 41L159d

го вулканического стекла и пироксенов. На внутренних стенках каналов на завершающей гидротермальной стадии отложились налёты железомарганцевых минералов. Фрагменты постройки были изучены в спилах под сканирующим электронным микроскопом с определением элементного химического состава.

На юго-западном склоне горы, на $17^{\circ} 09'$ с. ш., в пределах рудного поля Победа была поднята небольшая труба белого курильщика опал-талькового состава, с преобладанием талька. В её наружной стенке наблюдаются замещённые тальком фораминиферы (рис. 10).

Таким образом, как минимум 7 разновидностей белых курильщиков уже выявлены (карбонатные, ангидритовые, баритовые, тальковые, тальк-опаловые, опал-тальковые, брусит-арагонит-кальцитовые). Не исключено, что дальнейшие исследования приведут к открытию новых разновидностей.

В восточном борту рифтовой долины вне рудных полей, в координатах $17^{\circ} 54'$ с. ш. и $45^{\circ} 35'$ з. д. с глубины 3.3 км были подняты **зеленовато-белые курильщики**, которые реже, чем чёрные и белые, имеют формы труб. Такие постройки представлены двумя минеральными разновидностями — атакмит-тальковой (рис. 11) и атакмит-арагонитовой (рис. 12).

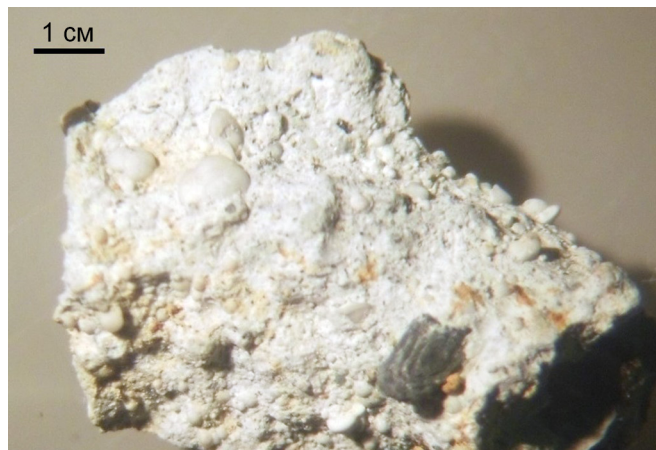


Рис. 10. Полая труба опал-талькового состава. Станция 37L107k

Fig. 10. Hollow tube of opal-talc composition. Station 37L107k

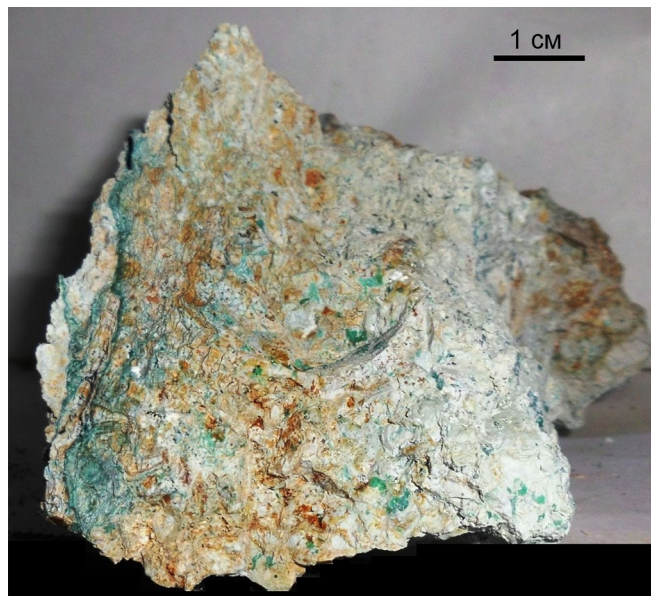


Рис. 11. Гидротермальная атакмит-тальковая постройка с гидроксидами железа (бурое). Станция 36L241d

Fig. 11. Hydrothermal atacamite-talc structure with iron hydroxides (brown). Station 36L241d

На дне наблюдаются участки, где БКО пропитаны флюидами, несущими минералы группы атакмита. В них выявлено большое количество псевдоморфоз этих минералов по фораминиферам и трубкам червей. При движении аппаратуры над такими осадками поднимается их взвесь, окрашенная в характерные голубовато-зелёные тона. В составе атакмит-тальковой минерализации установлено высокое содержание Co — более 1 кг/т, Cu — более 8 кг/т и Cr — более 1 кг/т, а также присутствие Zn — более 200 г/т и Ni — более 600 г/т. И если медь содержат минералы группы атакмита, то присутствие Zn, Ni и высокие содержания Co и Cr, возможно, связаны с наноразмерными фазами этих элементов.

Постройка атакмит-арагонитового состава, имеющая форму полой трубы, поднята на склоне подвальной горы $14^{\circ} 40'$. Стенки трубы сложены радиально-лучистым арагонитом с минералами группы атакмита и магнетитом. Необычным тут является тесное срастание низкотемпературного арагонита с магнетитом (рис. 12).

Зелёные курильщики сложены минералами группы атакмита, их трубы были подняты на рудных полях Ашадзе-2 и Петербургское (рис. 13). На поле Ашадзе-2 это были полые трубы, как одиночные, так и сросшиеся, причём пересекающиеся. Пересечение двух труб возможно лишь в рыхлых осадках, о чём и свидетельствуют многочисленные псевдоморфозы по фораминиферам, наблюдаемые в стенках труб.

На рудном поле Петербургское зелёный курильщик представлен запечатанной трубой, сложенной почти нацело ассоциацией атакмита с паратакмитом (рис. 14). Точный минеральный состав получен с использованием рентгенофазового метода.

Одним из наиболее интересных открытий в пределах РРР является находка построек и труб **оранжевых курильщиков**, сложенных нацело оксигидроксидами железа или в сочетании с железомарганцевыми оксидами. Важно отметить, что оксигидроксиды железа

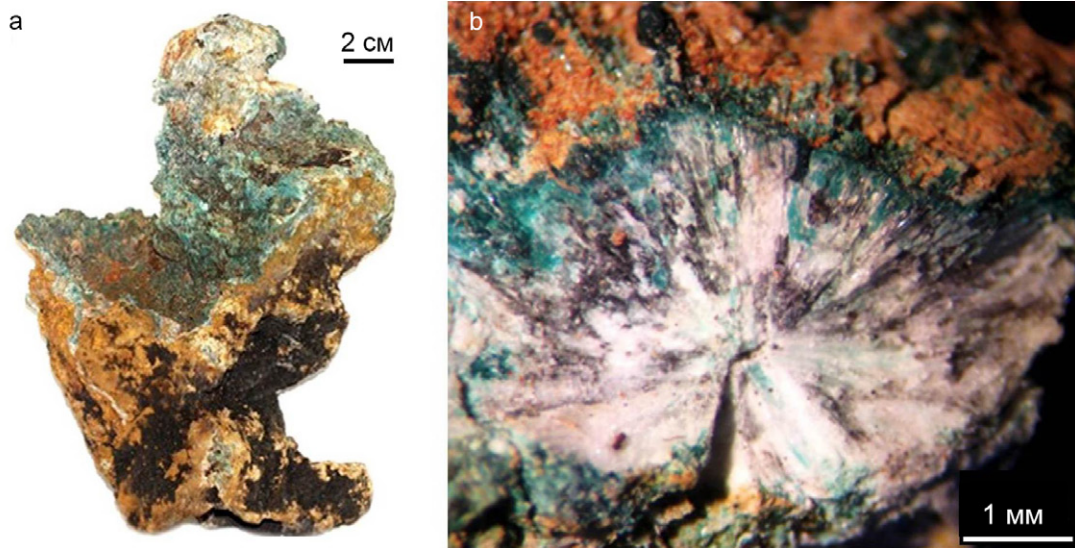


Рис. 12. Атакамит-арагонитовая постройка, станция 39L211d: а — форма с полым каналом, наружные стенки покрыты корочкой гётита (бурое) и минералами марганца (чёрное); б — радиально-лучистый арагонит с включениями магнетита (чёрное), атакамита (зеленое) и налётом оксигидроксидов железа (бурое). Увеличенный фрагмент торца стенки атакамит-арагонитовой постройки

Fig. 12. Atacamite-aragonite structure, station 39L211d: a — a form with a hollow channel, the outer walls are covered with a crust of goethite (brown) and manganese minerals (black); b — radial-rayed aragonite with inclusions of magnetite (black), atacamite (green) and a coating of iron oxyhydroxides (brown). Enlarged fragment of the end wall of the atacamite-aragonite structure

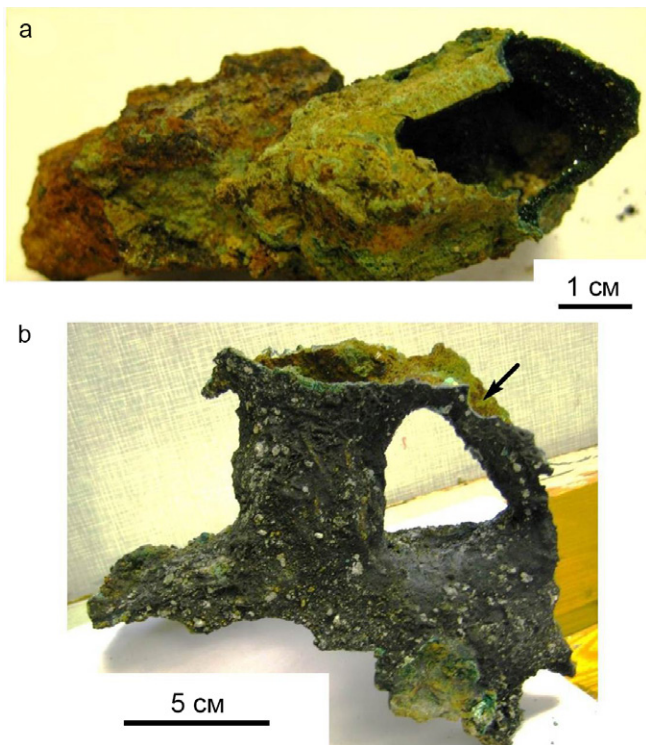


Рис. 13. Полая труба зелёного курильщика, сложенная минералами группы атакамита и оксигидроксидами железа (а), и сросток двух полых пересекающихся труб зелёного курильщика с реликтами замещенных фораминифер и налетом на стенках минералов марганца (черное). Стрелкой показан фрагмент трубы со сломанной стенкой (б). Рудное поле Ашадзе-2. Станция 30L233k

Fig. 13. A hollow chimney of a green smoker composed of atacamite group minerals and iron oxyhydroxides (a), and a splice of two hollow intersecting chimneys of a green smoker with relics of replaced foraminifera and a coating of manganese minerals on the walls (black), the arrow shows a fragment of a chimney with a broken wall (b). Ashadze-2 ore field. Station 30L233k



Рис. 14. Атакамит-паратакамитовая запечатанная труба. Рудное поле Петербургское. Станция 33L159g

Fig. 14. Atacamite-paratacamite tube without hollow channel. Petersburgskoe ore field. Station 33L159g

отлагались непосредственно из гидротермальных растворов и не имеют отношения к окислению сульфидов.

В восточном борту рифтовой долины, на рудном поле Зенит-Виктория и в кальдере подводного вулкана Пюи де Фоль, наблюдались и были подняты полые открытые и запечатанные трубы гидроксидов железа (рис. 15).

Почему курильщики именно оранжевые? В 1961 г. геолог К. К. Зеленов наблюдал подводное изверже-

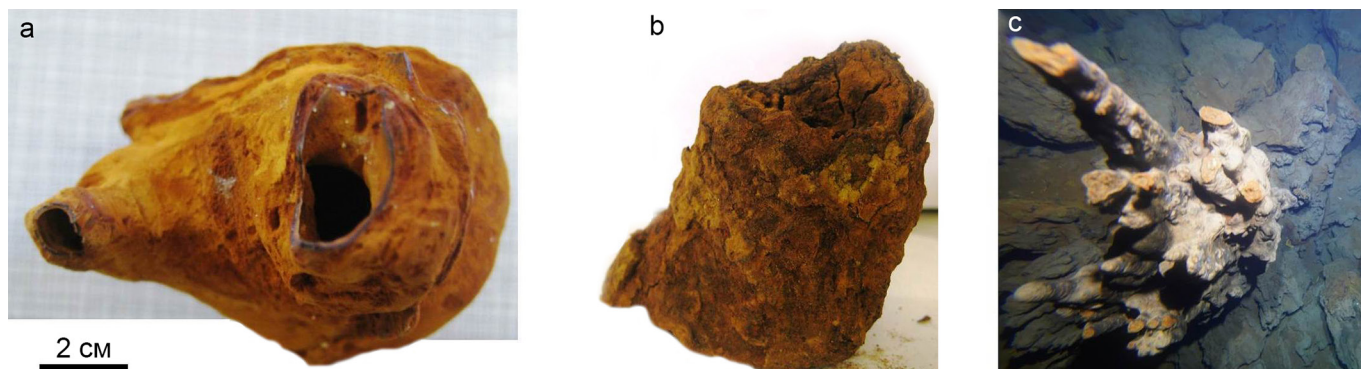


Рис. 15. Оранжевые курильщики: а — сроссток двух полых труб, состоящих из порошковых оксигидроксидов железа с бактериоморфными структурами, и концентрически-зональный прожилкок аморфного железосилицевого вещества (тёмно-коричневое), служащего каркасом, станция 31L347k; б — полая труба, сложенная порошковатыми гидроксидами железа с бактериоморфными структурами, станция 33L063g; с — сроссток запечатанных труб оксигидроксидов железа с минералами марганца, фрагмент фотопрофиля дна на станции 45L013t, рудное поле Пюи де Фоль

Fig. 15. Orange smokers: a — intergrowth of two hollow pipes consisting of powdered iron oxyhydroxides with bacteriomorphic structures and concentric veins of amorphous iron-silicon substance (dark brown), serving as a framework, station 31L347k; b — hollow pipe composed of powdered iron hydroxides with bacteriomorphic structures, station 33L063g; c — intergrowth of sealed pipes of iron oxyhydroxides with manganese minerals, fragment of photoprofile of the bottom at station 45L013t, Puy de Fol ore field

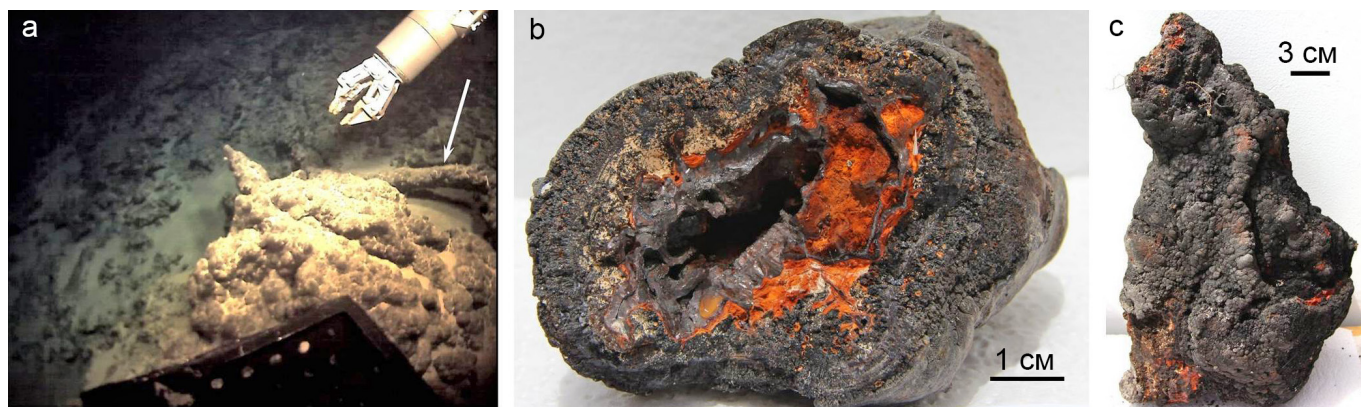


Рис. 16. Вертикальная и горизонтальная (показана стрелкой) трубы железомарганцевого состава: а — общий вид; фрагменты вертикальной (б) и горизонтальной (с) труб. Рудное поле Холмистое

Fig. 16. Vertical and horizontal (shown by arrow) pipes of ferromanganese composition: a — general view; fragments of vertical (b) and horizontal (c) pipes. Kholmistoye ore field

ние вулкана Бану-Вуху (Индонезия) и обратил внимание, что из подводных фумарол поднимается муровая струя воды, которая, достигая 1 м над дном, начинает мутнеть, приобретать оранжевый цвет вследствие выпадения из неё гидроксидов железа. Последние при осаждении на свежих базальтах образовывали в основании плотные, легко ломающиеся сизо-чёрные корки железомарганцевого состава (Зеленов, 1965).

В восточном борту рифтовой долины на рудном поле Холмистое нами были выявлены значительные площади развития железомарганцевых образований, в том числе и неактивных труб оранжевых курильщиков. По минеральному составу трубы рудного поля Холмистое аналогичны железомарганцевым конкрециям Тихого океана.

Опробование труб оранжевых курильщиков рудного поля Холмистое проводилось с борта океанографического судна «Янтарь» с помощью подводного необитаемого аппарата. Трубы отбирались манипулятором при видеонаблюдении с борта судна (рис. 16).

Подобные постройки в Атлантике ранее не были известны, и все находки железомарганцевых образований были представлены корками и конкрециями, о генезисе которых споры не прекращаются по настоящее время. Анализы железомарганцевых труб и построек, поднятых на рудном поле Холмистое, показали высокие содержания Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Pb, а также повышенное содержание в них редкоземельных элементов. Выявленные с помощью видео большие площади распространения железомарганцевых труб и построек на склонах и вершинах холмов в восточном борту рифтовой долины в районе 17–18° с. ш. позволяют сделать вывод об уникальном новом типе гидротермальных рудных образований, обогащенных Cu, Zn, Co, Ni, Sr и редкоземельными элементами. Холмы исследуемого участка расположены на глубине 2.5–3 км и связаны с молодым вулканизмом взрывного типа, о чём свидетельствуют поднятые пирокластические породы. Склоны и вершины холмов сложены железомарганцевыми постройками и трубами, отлагавшимися в гидротермальную стадию, последовавшую за вулканической.



Выводы

Трубы чёрных курильщиков (глубоководных полиметаллических сульфидов) формируются при выходе сфокусированного источника флюидов из подстилающих пород, перекрытых осадками, непосредственно в океанскую воду и составляют ничтожно малую долю (менее 1 %) от общей массы ГПС. В основании труб чёрных курильщиков всегда видны реликты изменённых осадков.

Белые и цветные трубы курильщиков представляют не только минералогический интерес, а также позволяют познать процессы эндогенной дегазации на дне океана и оценить потенциальную рудоносность этого типа придонных гидротермальных построек.

К настоящему времени на дне Атлантического океана в пределах РРР САХ известно пять цветовых разновидностей курильщиков: чёрные, белые, зеленовато-белые, зелёные, оранжевые. В каждой цветовой разновидности выделяется несколько типов по минеральному составу.

Помимо глубоководных сульфидных оруденений выявлено два ранее неизвестных здесь попутных типа минерального сырья: сырьё на медь постройки минералов группы атакамита и сырьё на Fe, Mn и редкие земли (железомарганцевые образования).

Образование глубоководных полиметаллических сульфидов наблюдается только там, где есть осадки, которые служат биохимическим барьером для осаждения сульфидов.

Литература / References

- Арсанова Г. И. Вода гидротерм вулканических областей: метеорная или вулканическая? // Пространство и Время: Альманах: Электронное научное издание. Т. 1. Вып. 1. 2012. С. 1–12.
 Arsanova G. I. Water of hydrotherms from volcanic regions: meteoric or volcanic? Electronic scientific publi-

cation Almanac Space and Time. V. 1, 1, 2012, pp. 1–12. (in Russian)

Арсанова Г. И. Сверхкритическое состояние воды как причина геологических явлений // Earth Sciences. The scientific heritage, 2020. № 45. С. 7–17.

Arsanova G. I. Supercritical state of water as a cause of geological phenomena. Earth Sciences. The scientific heritage, 2020, No. 45, pp. 7–17. (in Russian)

Богданов Ю. А. Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 2006. 527 с.

Bogdanov Yu. A. Hydrothermal ore genesis of the ocean floor. Moscow: Nauka, 2006, 527 p. (in Russian)

Зеленов К. К. Некоторые особенности подводного вулканизма на примере вулкана Бану Вуху (Индонезия) // Вулканогенно-осадочные формации и полезные ископаемые. М: Наука, 1965. С. 19–26.

Zelenov K. K. Some peculiarities of underwater volcanism on the example of the Banu Wuhu volcano (Indonesia). Volcanogenic-sedimentary formations and useful minerals. Moscow: Nauka, 1965, pp. 19–26. (in Russian)

Силаев В. И., Добрецова И. В., Антошкина А. И., Филиппов В. Н., Макеев Б. А., Смолева И. В., Хазов А. Ф. Гидротермальные сульфидные оруденения в Российском разведочном районе Срединно-Атлантического хребта // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. Вып. 25. Пермь, 2022. С. 226–238.

Silaev V. I., Dobretsova I. V., Antoshkina A. I., Filippov V. N., Makeev B. A., Smoleva I. V., Khazov A. F. Hydrothermal sulfide mineralizations in the Russian exploration area of the Mid-Atlantic Ridge. Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky. Issue 25. Perm, 2022, pp. 226–238. (in Russian)

Hodgkinson M. R. S., Webber A. P., Roberts S., Mills R. A., Connelly D. P., Murtom B. J. Talc-dominated sea floor deposits reveal a new class of hydrothermal system // Nature Communications, 2015. V. 6. No. 1. P. 1–11.

Поступила в редакцию / Received 17.08.2024



Выявление геохимических маркеров ореольной проекции глубокозалегающих рудных тел по результатам опробования снежного покрова (на примере Турунтаевского полиметаллического месторождения)

М. П. Тентюков^{1, 2}, И. С. Соболев⁴, Д. В. Камашев³, Г. В. Игнатьев³, Р. И. Шайбеков³,
В. И. Михайлов^{1, 5}, Е. Г. Язиков⁶, Р. Ю. Гаврилов⁶, В. С. Бучельников²

¹ Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия; tentukov@yandex.ru

² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия; mpt@iao.ru; victor.buchelnikov@yandex.ru

³ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
kamashev@geo.komisc.ru; ignatiev.grigoriy@gmail.com; shaybekov@geo.komisc.ru

⁴ ООО «Гео Сервис», Томск, Россия; geolsob@yandex.ru

⁵ Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия; system14@rambler.ru

⁶ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
yazikoveg@tpu.ru; gavrilovry@tpu.ru

Рассматривается возможность использования метода ступенчатого центрифугирования для выявления ореольной проекции глубокозалегающих рудных тел по геохимическим маркерам, в качестве которых выступают элементы-примеси из трех парагенетических групп: сульфобилы, сидеробилы, литобилы. Выявлен эффект концентрирования элементов-примесей, приуроченный к приконтактному с почвой слою кристаллов глубинной изморози, образование которого, в свою очередь, связано с существованием в нижней части снежной толщи особой кристаллообразующей среды. Устойчивость сигнала геохимической аномалии в этой части снежного разреза поддерживается постоянным диффузионным массопереносом легкорастворимых соединений элементов-примесей в составе почвенной влаги. Постулируется, что образование геохимической аномалии в слое глубинной изморози связано с образованием клатратов на поверхности ледяных кристаллов глубинной изморози. Их появление инициируется микропроцессами на границе раздела фаз (газ ↔ жидкость ↔ кристалл). Предложена феноменологическая модель эпитаксиального механизма формирования геохимических аномалий в снежной толще, позволяющая по-новому организовать проведение геохимических поисков глубокозалегающих рудных тел по снежному покрову.

Ключевые слова: геоаэрозоли, глубинные месторождения, геохимические поиски, снежный покров, центрифугирование, эпитаксия

Identification of geochemical markers of the halo projection of deep-seated ore bodies based on the results of sampling the snow cover (using the example of the Turuntaevsky polymetallic deposit)

M. P. Tentyukov^{1, 2}, I. S. Sobolev⁴, D. V. Kamashev³, G. V. Ignatiev³, R. I. Shaibekov³,
V. I. Mikhailov^{1, 5}, E. G. Yazikov⁶, R. Yu. Gavrilov⁶, V. S. Buchelnikov²

¹ Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

² V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch RAS, Tomsk, Russia

³ Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

⁴ Geo Service, Tomsk, Russia

⁵ Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

⁶ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The paper considers the possibility of using the step centrifugation method to detect the halo projection of deep-lying ore bodies using geochemical markers, which are trace elements from three paragenetic groups: sulfophiles, siderophiles and lithophiles. The paper presents results of comparative studies of the distribution of trace elements in centrifugates of snow water samples obtained at different rotation speeds. The information content of the new method is assessed as applied to geochemical surveys of snow cover, taking into account the microphysical properties of snow. The epitaxial mechanism of amplification of the signal of trace element concentration in snow grains and the related features of the formation of geochemical anomalies in the snow mass are discussed.

Keywords: *geoaerosols, abyssal deposit, geochemical prospecting, snow cover, centrifugation, epitaxy*

Для цитирования: Тентюков М. П., Соболев И. С., Камашев Д. В., Игнатьев Г. В., Шайбеков Р. И., Михайлов В. И., Язиков Е. Г., Гаврилов Р. Ю., Бучельников В. С. Выявление геохимических маркеров ореольной проекции глубокозалегающих рудных тел по результатам опробования снежного покрова (на примере Турунтаевского полиметаллического месторождения) // Вестник геонаук. 2025. 1(361). С. 34–46. DOI: 10.19110/geov.2025.1.4

For citation: Tentyukov M. P., Sobolev I. S., Kamashev D. V., Ignatiev G. V., Shaibekov R. I., Mikhailov V. I., Yazikov E. G., Gavrilov R. Yu., Buchelnikov V. S. Identification of geochemical markers of the halo projection of deep-seated ore bodies based on the results of sampling the snow cover (using the example of the Turuntaevsky polymetallic deposit). Vestnik of Geosciences, 2025, 1(361), pp. 34–46, doi: 10.19110/geov.2025.1.4



Изучение процессов глубинного массопереноса вещества, и в частности миграции химических элементов, — важный аспект при решении фундаментальных вопросов дегазации Земли и прикладных геохимических исследований при поисках глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых.

Известна гипотеза о возможности транспортировки металлов и ряда других химических элементов на поверхности микропузырьков природных газов (Etiope G., Martinelli, 2002; Kristiansson K., Malmqvist, 1982; Price, 1986). Согласно данной гипотезе, миграция глубинных газовых флюидов к дневной поверхности осуществляется по системам микротрещин и капилляров в виде потока пузырьков (геогаз) коллоидной размерности со скоростью, существенно превышающей диффузионное перемещение.

В рамках «микропузырькового» механизма геогаз рассматривается как восходящий из глубин Земли поток микропузырьков газа с включениями наночастиц, преимущественно представленными элементами-примесями. Микропузырьки геогаза образуют как химически активные соединения (H_2O , CO_2 , H_2S , NH_3 , H_2 и N_2), так и менее активные — метан, легкие и тяжелые углеводороды, включая благородные (He, Ar) и радиоактивные (Rn) газы (Etiope and Martinelli, 2002). Исследования переносимых геогазом наночастиц (Wei et al., 2013; Lu et al., 2023) показали, что их размер в основном колеблется в интервале от 10 до 300 нм. Последнее дает основание включить в «микропузырьковый» механизм переноса глубинных флюидов некоторые из положений наноминералогии.

Отмечается, что нанодисперсное состояние минерального вещества весьма характерно для верхних частей литосферы и продуктов геологической деятельности микроорганизмов, а также для аэрозольных частиц атмосферы и минеральных взвесей природных вод (Юшкин, 2005). По мнению Н. П. Юшкина, в этих природных системах могут формироваться не только наноагрегаты, но и особые минеральные микро- и нанопарагенезисы. Так, в работе Г. Н. Гамянина с соавторами (2000) приводятся сведения о необычной сфероидальной форме минералов, обнаруженных в золоторудном гидротермальном рудопроявлении. Часто эти сфероиды представлены самородными и интерметаллидными фазами, оксидными и сульфидными соединениями. Их поверхностное и внутреннее строение позволило авторам выдвинуть предположение, что они формируются в микрополостях внутри минеральных индивидов или агрегатов по автоклавному механизму, когда при избыточном давлении газовой фазы формировались ассоциации высокобарических минералов.

Но автоклавный принцип — не единственный механизм образования наноиндивидов и наноагрегатов. М. И. Новгородова с соавторами отводит ведущую роль в формировании сфероидов кавитационным эффектам (2000а, 2003б).

На сегодняшний день представительный микро- и наноразмерный материал, собранный над погребенными рудными месторождениями различных металлов, показывает, что над рудными зонами в почвенном воздухе присутствуют тонкодисперсные твердые фазы, по составу соответствующие рудным минералам (Wei et al., 2013; Sobolev 2018; Sobolev et al., 2022; Lu et al., 2023).

Важной, во многом определяющей научную новизну особенностью отмеченных научных исследований является комплексное изучение компонентного состава в системе «почвенный воздух — снежный покров» с акцентом на глубинный перенос вещества природными газами-носителями, в т. ч. в виде микро- и наноразмерных агломератов минеральных частиц, которые в рамках данной работы вслед за Kristiansson and Malmqvist (1987) мы предлагаем называть «геоаэрозоли». Учитывая парогазовый обмен веществом между снежным покровом и подстилающей почвой, качественную и количественную оценку геоаэрозолей считаем необходимым элементом исследований.

Результаты пока немногочисленных экспериментальных исследований в России и за рубежом свидетельствуют о наличии в зоне контакта «снег — почва» условий формирования проекции ореолов химических элементов над глубокозалегающими рудными объектами и залежами углеводородов (Колотов и др., 1967; Погребняк и др., 1979; Соболев, 2013; Jonasson, Allan, 1973; Kristiansson et al., 1990; Sobolev et al., 2018; Sobolev et al., 2022; Taivalkoski et al., 2019). Однако эти же результаты ставят ряд важных вопросов, без решения которых невозможно адекватно оценить информативность геохимического опробования снежного покрова при глубинном картировании. В частности, особенности телескопирования глубинных проекций рудных тел в снежную толщу и формирования геохимических ореолов в снежном покрове, изменение их контрастности, размеров, зональности, а также определение спектра наиболее устойчивых элементов-индикаторов глубинной эмиссии геоаэрозолей.

В этой связи важной составляющей изучения геоаэрозолей является установление зависимости элементного состава микро- и наноразмерных примесей от их гранулометрических характеристик. Такая информация может быть получена при ступенчатом центрифугировании снеговой воды, проб снежных разрезов. Задачей данного методического приема является разделение исходных твердофазных примесей, аккумулярованных в снежной толще, по их гранулометрическому составу на определенные размерные интервалы с последующим определением химического состава фракций в полученных центрифугатах.

Таким образом, цель данной работы — оценить информативность методики ступенчатого центрифугирования проб снеговой воды для выявления геохимических маркеров миграции геоаэрозолей в аспекте поисков глубокозалегающих минеральных скоплений.

Материалы и методы

Характеристика Турунтаевского рудного проявления свинца и цинка

Территория административно принадлежит Томскому району Томской области и расположена в 70 км на восток от Томска. Pb-Zn-руды Турунтаевского проявления залегают в породах нижнепалеозойского комплекса, слагающего Яйский горст фундамента (Парначев и др., 2010). Рудные тела Центральной зоны проявления локализованы на контакте вулканитов с филлитами в ореоле интенсивно измененных пород, интродуцированных дайками микродиоритов. Контакт между эффузивами и черносланцевой толщей пред-

ставлен мощной зоной дробления. По породам палеозойского фундамента развита кора выветривания, перекрытая чехлом горизонтально залегающих рыхлых отложений мощностью 75–90 м. Гидротермальные изменения проявляются главным образом в карбонизации, окварцевании и альбитизации. Главные рудные минералы — сфалерит, пирит, халькопирит, галенит. Зоны минерализации сопровождаются первичными ореолами рассеяния Zn – Pb – Cu – Sb – Ti – Zr – Bi с Ba в надрудной части гидротермальной колонны. Рудные интервалы характеризуются максимально высокими содержаниями Zn и Sb. Литохимической съемкой вторичные ореолы рассеяния в приповерхностном горизонте не выявлены. Полноценные геолого-разведочные работы прекращены в 1983 году. Небольшой объем буровых работ выполнен в 2022–2023 годах. Летом и зимой 2020 года по одному профилю, совпадающему с линией разведочного бурения, осуществлено опробование почвенного воздуха (активным способом) и снежного покрова. Над зоной минерализации в трех ловушках-коллекторах проведен пассивный сбор твердой фазы. В снеготалой воде и жидкости коллекторов над зоной минерализации определены повышенные концентрации Pb и Zn и ряда других компонентов (Sobolev et al., 2022; Гаврилов и др., 2023).

Надо отметить, что выбранный объект отвечает условиям, необходимым для разработки и тестирования методов глубинного геохимического картирования. Он характеризуется достаточной степенью геологической изученности, необходимой для адекватной интерпретации предполагаемых минералого-геохимических данных. Активной геолого-разведочной и иной хозяйственной деятельности в настоящее время на Турунтаевской площади нет.

Отбор послойных проб снега с помощью бороздового снегоотборника-плотномера конструкции М. П. Тентюкова

Данное устройство предназначено для изучения послойных изменений геохимических параметров снега, связанных с сублимационным метаморфизмом и загрязнением снежного покрова при его нарастании, а также для облегчения послойного отбора проб снега разной плотности при маршрутной снегосъемке (Патент..., 2023). Проверка устройства выполнена в разных ландшафтных условиях и при разной плотности снега (от 0.03 до 0.28 в тайге и до 0.52 г/см³ в тундре). Пример апробации бороздового снегоотборника в сопряжении со светопоглощающим экраном для визуализации стратиграфии снежной толщи показан на рис. 1.

Отбор проб снега

Снегоотбор в границах Турунтаевской площади производили из снежных разрезов перед началом снеготаяния 02.03.2024 (по достижении максимальной высоты снега). Шурф 2 заложен в пределах рудной зоны, а шурф 4 — на безрудном участке, высота снега в точках опробования составила 68 и 90 см соответственно. Размер полученного снежного бруска задавался параметрами снегоотборника-плотномера (5 × 9 × 28 см), что достаточно для получения 200–800 мл снеговой воды в широком интервале плотности снега. Полученные

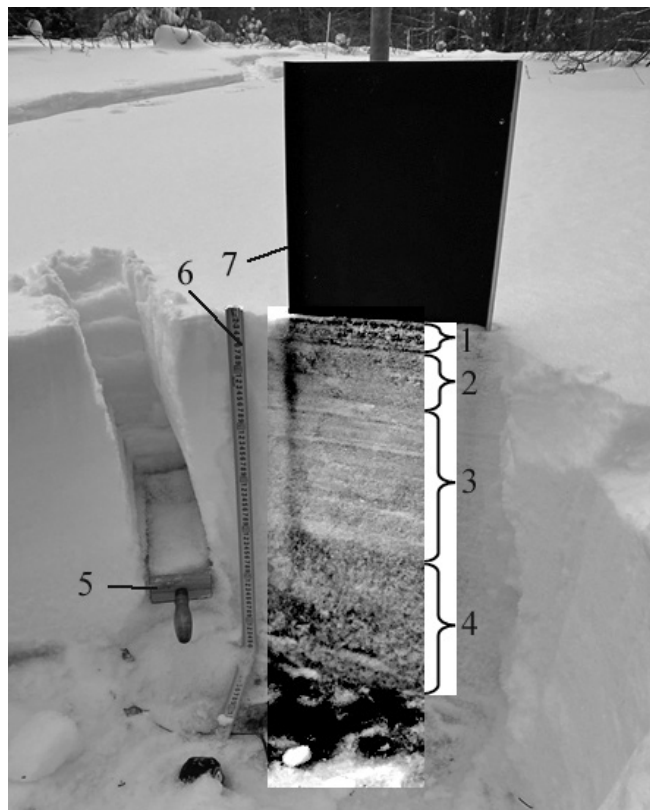


Рис. 1. Апробация бороздового снегоотборника-плотномера на ключевом участке «Ботсад СГУ» в сопряжении со светопоглощающим экраном для визуализации стратиграфии снежной толщи: 1 — свежеснеговпавший снег, 2 — мелкозернистый снег, 3 — среднезернистый снег, 4 — горизонт глубокой изморози, 5 — бороздовый снегоотборник-плотномер, 6 — рулетка, 7 — светопоглощающий экран

Fig. 1. Testing of a furrow snow sampler-densitometer at the key site of the SSU Botanical Garden in conjunction with a light-absorbing screen for visualizing the stratigraphy of the snow layer: 1 — freshly fallen snow, 2 — fine-grained snow, 3 — medium-grained snow, 4 — deep hoar horizon, 5 — furrow snow sampler-densitometer, 6 — tape measure, 7 — light-absorbing screen

таким образом бруски снега помещались в чистые полиэтиленовые пакеты.

Подготовка проб снега к анализу

Процедура пробоподготовки в день отбора заключалась в их взвешивании на электронных весах и расчете плотности снега (ρ , г/см³). После снег растапливали в закрытых пакетах при комнатной температуре. Перед анализом талая вода фильтровалась для удаления крупных взвешенных частиц через обеззоленные бумажные фильтры — «синюю ленту». Фильтры предварительно десятикратно отмывались деионизированной водой. В снеговой воде значения водородного показателя определяли потенциометрическим, а удельную электропроводность (ηS , мкСм/см) — кондуктометрическими методами.

Получение центрифугатов снеговой воды

С целью проведения исследований по установлению зависимости элементного состава примесей от их гранулометрических характеристик для проб глубокой изморози, взятых в нижней части шурфов, была



проведена процедура ступенчатого центрифугирования снеговой воды. Его задачей являлось разделение исходных твердофазных примесей геоаэрозолей по их гранулометрическому составу на определенные нанодиапазоны.

Для этого из оттаявших проб снега отбирали аликвоту снеговой воды объемом 10 см³, которую затем последовательно подвергали ступенчатому центрифугированию при скорости вращения 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 об/мин. Продолжительность каждого цикла центрифугирования составляла 60 минут. В конце цикла-ступени весь верхний слой, за исключением 1 см³ в придонной области пробирки, сливался в новую пробирку. Отобранный таким образом объем верхнего слоя подвергался дальнейшему центрифугированию, а полученный центрифугат, представляющий собой остаточную жидкость с осадком, передавался на химический анализ. Надо заметить, что после центрифугирования при 3500 об/мин верхний слой (с обозначением 3500>) также был передан на химический анализ.

Химический анализ центрифугатов

Определение концентрации элементов-примесей в центрифугатах проводили с помощью масс-спектрального метода с индуктивно связанной плазмой с использованием анализатора Agilent 7700x (Agilent Technologies США). Анализы проводились в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Сравнительную оценку распределения элементов-примесей в центрифугатах проводили по трем группам, геохимически близким элементам-примесям: литофилам, сульффилам, сидерофилам. Результаты представлены в таблицах 1–4.

Гранулометрический анализ центрифугатов

Центрифугаты для проведения гранулометрического анализа получали способом, аналогичным для химического анализа. Полученные таким образом центрифугаты были исследованы методом динамического рассеяния света на приборе Malvern ZetaSizer Nano ZS (He/Ne-лазер, 4 мВт, 633 нм) при 25 °С в кювете DTS1070 для определения размеров содержащихся в них частиц твердой фазы (гидродинамический диаметр геоаэрозолей). Измерения проводились в ЦКП «Химия» Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Непосредственно перед измерением образцы были обработаны в ультразвуковой ванне в течение 5 минут для равномерного распределения дисперсной фазы в объеме. По каждому измерению объемного распределения частиц по размерам оптимальное время накопления корреляционной функции определялось программным обеспечением прибора автоматически. Соотношение размеров частиц показано в виде гистограмм распределения (рис. 2), имеющих ряд максимумов. Последнее обусловлено тем, что аэрозольное вещество, как правило, представляет собой сложную полидисперсную смесь. Объемное содержание фракций наночастиц в образцах рассчитано интегрально по соотношению (%) площади фигур, описывающих данные распределения частиц по размерам в линейных координатах.

Результаты и обсуждение

В начале данного раздела необходимо сделать некоторые пояснения. Принимается, что наночастицы (геоаэрозоли), поступающие в составе глубинных флюидов, могут влиять на особенности протекания

Таблица 1. Химический состав центрифугатов снеговой воды из шурфа 2, мкг/л (проба 2-9)

Table 1. Chemical composition of snow water centrifugates from pit 2, mkg/l (sample 2-9)

Элементы Elements	1	2	3	4	5	6	7	8
Литофилы / Lithophiles								
Rb	0.22	0.3	0.25	0.29	0.34	0.37	0.36	0.37
Sr	6.5	6.7	6.6	6.7	6.6	6.6	6.6	6.8
Ba	7.5	7.4	7.2	7.4	7.4	10	11	11
Ti	0.23	0.13	0.12	0.08	0.1	0	0	0
V	0.32	0.3	0.31	0.36	0.34	0.35	0.39	0.35
Сидерофилы / Siderophiles								
Cr	0.17	0.16	0.22	0.26	0.25	0.28	0.31	0.31
Mn	10	10	10	11	10	11	11	11
Co	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09
Ni	0.52	0.93	0.81	0.67	0.77	0.78	0.77	0.82
Сульффилы / Sulfophiles								
Cu	0.21	0.86	0.37	0.46	1.1	2.2	1.6	1.5
Zn	2.8	4.3	3.3	3.5	4.7	6.1	5	5.2
Sb	0.48	0.5	0.49	0.5	0.49	0.48	0.48	0.5
Pb	0.43	0.52	0.42	0.36	0.29	0.22	0.2	0.19

Примечание: колонки 1–7 характеризуют химический состав центрифугатов, полученных при скорости вращения центрифуги 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 об/мин соответственно, а колонка 8 отражает химический состав жидкости, остающейся после завершения полного цикла ступенчатого центрифугирования.

Note: Columns 1–7 characterize the chemical composition of the centrifugates obtained at a centrifuge rotation speed of 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 rpm, respectively, and column 8 reflects the chemical composition of the liquid remaining after completion of a full cycle of step centrifugation.



Таблица 2. Химический состав центрифугатов снеговой воды из шурфа 2, мкг/л (проба 2-12)

Table 2. Chemical composition of snow water centrifugates from pit 2, mkg/l (sample 2-12)

Элементы Elements	1	2	3	4	5	6	7	8
Литофилы / Lithophiles								
Rb	0.15	0.16	0.15	0.17	0.25	0.2	0.22	0.24
Sr	2.1	2.1	2.1	2.1	2.6	2.1	2	2.3
Ba	2.2	2.2	2.3	2.2	14	2.3	2.6	3.1
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0.13	0.12	0.12	0.11	0.09	0.11	0.08	0.11
Сидерофилы / Siderophiles								
Cr	0.2	0.18	0.17	0.15	0.26	0.17	0.14	0.17
Mn	2.3	2.3	2.3	2.3	3	2.5	2.3	2.6
Co	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	2.4	2.4	2.4	2.3	2.7	2.3	2.1	2.5
Сульфобилы / Sulfophiles								
Cu	0.43	0.49	0.43	0.37	0.85	0.95	0.63	0.89
Zn	4.4	4.4	4.2	4	10.2	5.4	5.2	5.9
Sb	0.38	0	0.34	0.37	0.35	0.36	0.33	0.39
Pb	0.3	0.27	0.33	0.29	0.28	0.23	0.24	0.4

Таблица 3. Химический состав центрифугатов снеговой воды из шурфа 4, мкг/л (проба 4-14)

Table 3. Chemical composition of snow water centrifugates from pit 4, mkg/l (sample 4-14)

Элементы Elements	1	2	3	4	5	6	7	8
Литофилы / Lithophiles								
Rb	0.19	0.23	0.26	0.28	0.26	0.3	0.28	0.29
Sr	6.1	6.1	6.3	6.6	6.2	6.5	6.6	6.5
Ba	6.6	6.4	7.5	7.1	6.4	6.9	7.4	7.2
Ti	0.11	0.27	0.15	0.09	0.08	0	0	0
V	0.26	0.25	0.21	0.24	0.2	0.18	0.2	0.22
Сидерофилы / Siderophiles								
Cr	0.2	0.25	0.21	0.25	0.25	0.26	0.26	0.26
Mn	10	8.1	11	11	10	11	11	11
Co	0	0	0.07	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08
Ni	0.38	0.6	0.6	0.53	0.51	0.75	0.78	0.71
Сульфобилы / Sulfophiles								
Cu	0	0.26	0.74	0.32	0.34	0.65	0	0.37
Zn	2.6	3.8	14	5.1	4.8	6.2	5.4	5.2
Sb	0.49	0.48	0.5	0.49	0.49	0.48	0.48	0.5
Pb	0.37	0.41	0.25	0.3	0.25	0.23	0.25	0.21

Таблица 4. Химический состав центрифугатов снеговой воды из шурфа 4, мкг/л (проба 4-16)

Table 4. Chemical composition of snow water centrifugates from pit 4, mkg/l (sample 4-16)

Элементы Elements	1	2	3	4	5	6	7	8
Литофилы / Lithophiles								
Rb	0.09	0.11	0.12	0.1	0.11	0.12	0.12	0.13
Sr	1.5	1.5	1.6	1.4	1.5	1.5	1.6	1.5
Ba	1.9	1.9	2	1.7	2.2	2.5	3.7	3.5
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0.1	0.11	0.1	0.1	0.1	0.07	0.08	0.09
Сидерофилы / Siderophiles								
Cr	0.29	0.26	0.26	0.22	0.22	0.19	0.21	0.22
Mn	2.7	2.8	2.9	2.6	2.8	2.8	2.9	2.8
Co	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0.76	1	0.97	0.67	0.82	0.73	0.78	0.77
Сульфобилы / Sulfophiles								
Cu	0.05	0.19	0.13	0.12	0.16	0.5	0.24	0.28
Zn	1.7	2.6	2.4	2.1	2.4	2.6	2.7	2.7
Sb	0.27	0	0.16	0.06	0.31	0	0	0
Pb	0	0.12	0.1	0.07	0.06	0.09	0.08	0.1

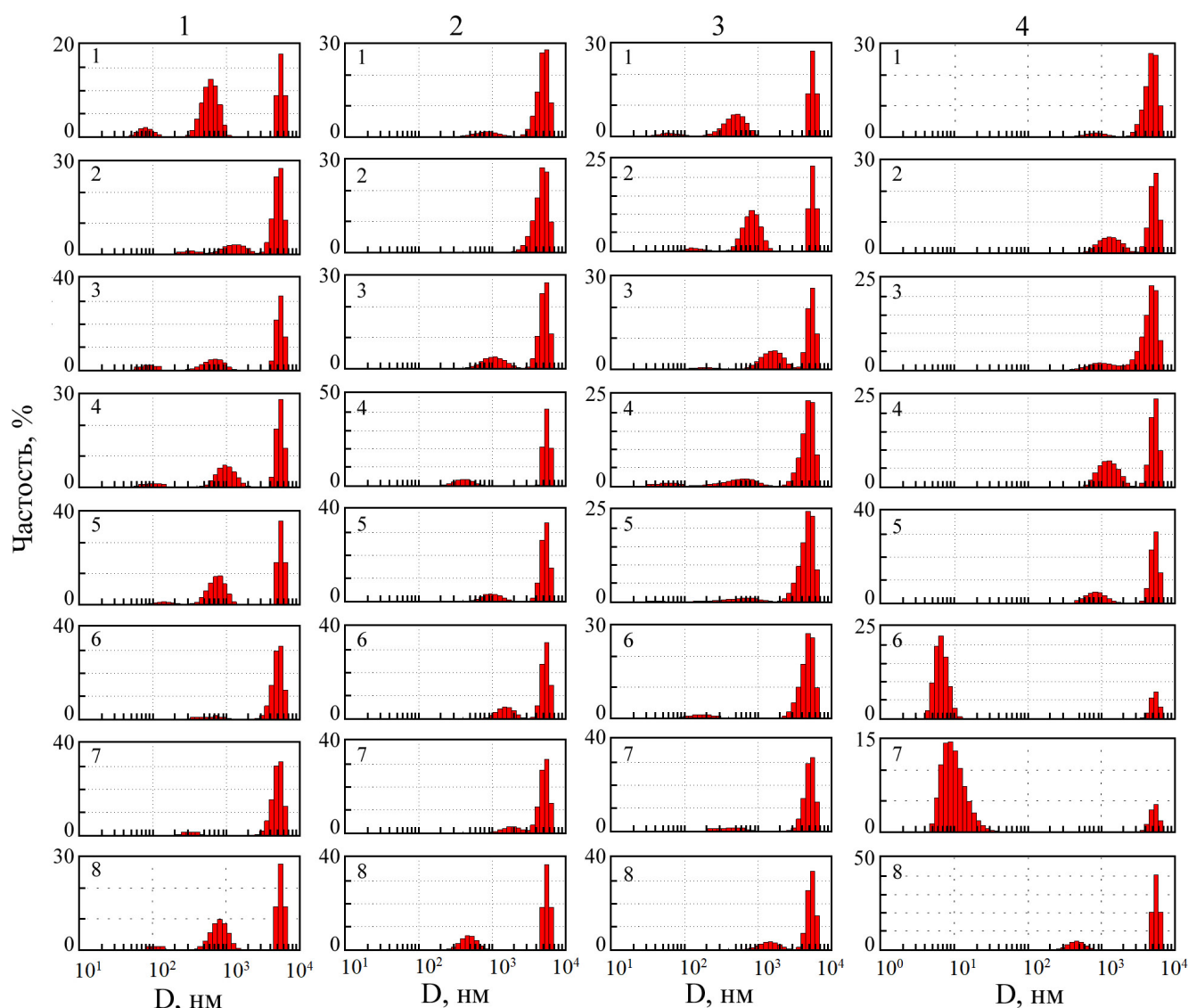


Рис. 2. Изменение соотношения гранулометрических фракций твердого вещества (получены методом динамического рассеяния света — ДРС) в центрифугатах проб снеговой воды в пределах рудной (1 и 2) и безрудной (3 и 4) зон. 1 и 2 — пробы 2-9 и 2-12; 3 и 4 — пробы 4-14 и 4-16; 1–7 — центрифугаты, полученные при скорости вращения центрифуги 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 об/мин, 8 — остаточная жидкость после цикла центрифугирования

Fig. 2. Change in the ratio of granulometric fractions of solid matter (obtained by the dynamic light scattering — DLS method) in centrifugates of snow water samples within the ore (1 and 2) and barren (3 and 4) zones. Additional designations: 1 and 2 — samples 2-9 and 2-12; 3 and 4 — samples 4-14 and 4-16; 1–7 — centrifugates obtained at a centrifuge rotation speed of 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 rpm, 8 — residual liquid after the centrifugation cycle

химических реакций с участием субохлажденной капиллярной влаги в снежной толще. Поскольку состав и реакционная способность геоаэрозолей могут сильно отличаться от осевших аэрозольных частиц, присутствие геоаэрозолей в снежной толще открывает новые аспекты в изучении условий формирования ореольной проекции глубокозалегающих рудных тел по результатам опробования снежного покрова.

Вероятно, важную роль также играют наноструктуры внутри более крупных частиц, которые часто содержат наноразмерные элементы, такие как агломераты минеральных зерен, наночастицы в полимерных структурах. Эти сложные морфологические особенности, вероятно, воздействуют на ряд свойств геоаэрозолей в снежной толще. Например, наноструктуры, по всей вероятности, влияют на процесс криогенного концентрирования элементов-примесей посредством капиллярной конденсации поровой влаги в снежной тол-

ще. Кроме этого, наноразмерные водные пленки на гранях ледяных кристаллов снежных зерен, а также наноразмерные активные центры на поверхностях геоаэрозолей в снежной толще могут служить средой для гетерогенной химии.

Надо заметить, что для наночастиц размер и связанное с этим параметром действие поверхностных сил имеет существенное значение. Отмечается, что размерные факторы заметно влияют на конституционные особенности и свойства наноминералов (Юшкин, 2005). В рамках современных представлений к ним относят элементарные минеральные структуры — наноиндивиды — с размерной границей 10–100 нм. По Н. П. Юшкину (2005), эти наноиндивиды сложены ограниченным числом структурообразующих частиц. Переход от минералообразующих сред к наноминеральным структурам характеризуется их фазовой гетерогенизацией. При этом сохраняется структурное



единство системы «дисперсная фаза – дисперсная среда», обусловленная ее агрегативной электростатической устойчивостью (Юшкин, 2005). Агрегация в данном случае происходит без их слияния, и при этом возможно появление нанокластеров и наноблоков, состоящих из нанокристаллов. Предполагается, что размеры таких нанообразований могут фиксироваться в более широком нанодиапазоне, чем 10–100 нм.

Распределение минеральных частиц по размерам в центрифугатах снеговой воды

Частотные графики распределения частиц по размерам, построенные для рудной и безрудной зон, приведены на рис. 2. Сравнительный анализ распределения частиц по размерам показывают, что, как правило, оно отражает смешение двух-трех совокупностей (фракций) частиц и характеризуется большой дисперсностью. Значения мод и процентное соотношение фракций приведены в табл. 5. Если принять, что размерные моды отражают различия в источниках частиц, то только частицы, попавшие в интервал 7–200 нм, могут быть связаны с геоаэрозолями. Более крупные (200–2000 нм) можно отнести к ультрадисперсным минеральным частицам и их агрегатам, а самые крупные — к минеральным индивидам и их блокам (2000–7500 нм). Хотя надо отметить, что эти крайние значения немного «не дотягивают» до нижней границы, проходящей в интервале 10–100 мкм, предложенном А. Г. Булахом (1989) для нижней границы минерального мира.

Особенности распределения частиц и соотношений фракций в центрифугатах в рудной зоне

При сравнении значений D_{cp} частиц в каждом из семи центрифугатов (табл. 5), установлено, что при относительно равных величинах D_{cp} (3093 для верхней пробы и 3021 для нижней) в остаточном растворе (>3500) после центрифугирования размер частиц в верхней пробе почти в два раза меньше, чем в нижней (1280 против 2844 нм соответственно). Сопоставление соотношений фракций показало, что в нижней пробе практически во всех центрифугатах значительно преобладает доля крупных частиц, тогда как для верхней пробы появление средних и мелких частиц существенно снижает долю крупных частиц, хотя какой-то зависимости от скорости центрифугирования не наблюдается.

Особенности распределения частиц и соотношений фракций в центрифугатах в безрудной зоне

Сопоставляя значения D_{cp} частиц в каждом из семи центрифугатов (табл. 5), можно заметить, что размер частиц в верхней пробе почти в два раза меньше, чем в нижней (1027 и 2252 нм соответственно). Различия наблюдаются также при сравнении соотношений фракций: доля крупной фракции в нижней пробе ниже, чем в верхней. Она становится еще заметнее, если сравнивать центрифугаты верхней и нижней проб, полученных при одной скорости вращения. Так, с увеличением скорости центрифуги после режима 2000 об/мин

Таблица 5. Количественные параметры соотношений гранулометрических фракций в центрифугатах проб снеговой воды

Table 5. Quantitative parameters of the ratios of granulometric fractions in centrifugates of snow water samples

Центрифугаты, об/мин Centrifugates, rpm	Dcp, нм	Отметка значения моды/ соотношение фракции (нм/%) Mode value mark/ fraction ratio (nm/%)			Dcp, нм	Отметка значения моды/ соотношение фракции (нм/%) Mode value mark/ fraction ratio (nm/%)		
		Мода 1 Mode 1	Мода 2 Mode 2	Мода 3 Mode 3		Мода 1 Mode 1	Мода 2 Mode 2	Мода 3 Mode 3
	Рудная зона / Ore zone							
	Разрез 2, проба 2-9 Section 2, sample 2-9				Разрез 2, проба 2-12 Section 2, sample 2-12			
500	1181	5590/36	618/56	81/8	1154	4961/90	872/10	–
1000	1247	4789/88	1053/12	–	2378	4760/99	–	171/1
1500	1059	5430/71	699/26	89/2	1953	5162/77	1116/23	–
2000	1200	5439/63	1027/35	85/2	2017	5579/83	414/17	–
2500	1053	5590/54	763/43	145/3	4892	5308/84	1024/16	–
3000	1600	5063/95	506/4	115/1	3452	5590/92	489/8	–
3500	1623	5035/98	343/2	–	4065	5167/86	1953/14	–
>3500	3093	5590/56	833/43	112/1	3021	5590/74	486/26	–
	Безрудная зона / Ore-free zone							
	Разрез 4, проба 4-14 Section 4, sample 4-14				Разрез 4, проба 4-16 Section 4, sample 4-16			
500	879	5590/55	501/40	66/5	2788	5590/32	677/68	–
1000	1006	5590/46	845/50	136/4	2233	5220/68	1382/32	–
1500	933	5330/63	1606/34	199/3	2168	4656/86	1108/14	–
2000	612	4829/81	604/16	49/3	2003	5296/59	1290/41	–
2500	996	4725/90	643/9	42/1	1618	5336/74	852/26	–
3000	1114	4779/98	246/1	119/1	1812	5328/17	–	7/82
3500	1649	5097/94	499/6	–	3148	5283/11	–	10/89
>3500	3063	5333/82	1479/17	166/1	3039	5590/81	458/19	–



доля крупных частиц в нижней пробе уменьшается в кратном размере. Для рудной зоны такой контрастности не выявлено (табл. 5).

Анализ динамики соотношений элементов-примесей в цикле центрифугирования: рудная зона

На рис. 3 показана изменчивость соотношений элементов-примесей в цикле центрифугирования, относящихся к трем группам: сидерофилам, сульфософилам и литофилам. Общее, что можно отметить в изменчивости соотношений элементов-примесей на каждом этапе центрифугирования, это то, что после 2000 об/мин в центрифугатах увеличивается содержание большинства проанализированных элементов. Сопоставление рис. 3 с данными из табл. 5 дает основание считать, что выявленный эффект связан с тем, что большинство элементов входит в состав средней и мелкой фракций.

На этом фоне несколько выделяется динамика содержания Ti в пробе 2-9. Для данного элемента наблюдается устойчивый тренд снижения концентрации в центрифугатах от 500 до 2500 об/мин, после чего он перестает фиксироваться в осадках, полученных при больших скоростях вращения центрифуги. Сопоставление динамики концентрации Ti в цикле центрифугирования

(рис. 3) с данными табл. 5 показывает, что в интервале скоростей вращения центрифуги 500–2500 об/мин доля крупных частиц с титаном в центрифугатах заметно снижается, при том что содержание Rd и V растет с уменьшением фракций.

Для элементов-сульфофилов характерен похожий тренд: до 2000 об/мин отмечается относительное снижение содержания в центрифугатах, затем резкое увеличение сигнала в центрифугате, полученном при 2500 об/мин. При этом во всех центрифугатах содержание Zn одинаково высокое. Если учесть, что в автомобильных выхлопах наряду со свинцом устойчиво фиксируется цинк (Геохимия..., 1990), то, возможно, усиление сигнала данного терморморфного элемента-индикатора рудной залежи связано с упомянутым обстоятельством.

Анализ динамики соотношений элементов-примесей в цикле центрифугирования: безрудная зона

На рис. 4 показана изменчивость соотношений элементов-примесей в цикле центрифугирования. Сопреженный анализ изменчивости соотношений элементов-примесей, относящихся к трем группам (сидерофилы, сульфософилы, литофилы), показал, что

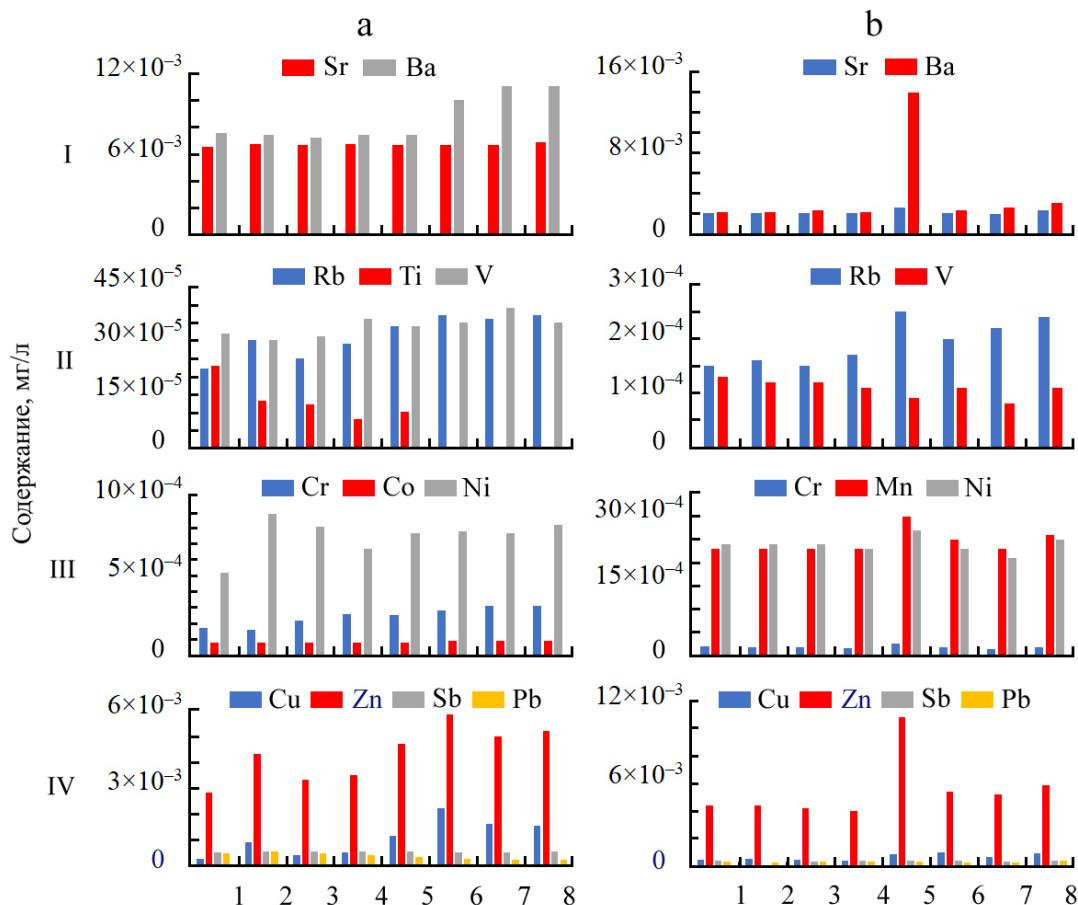


Рис. 3. Соотношение содержаний элементов-литофилов (I и II), элементов-сидерофилов (III) и элементов-сульфофилов (IV) в снеговой воде в рудной зоне. а и б — пробы 2-9 и 2-12, взятые на уровнях 23–28 и 8–13 см от почвенной поверхности соответственно; 1–7 — центрифугаты, полученные при разной скорости вращения центрифуги: 1 — 500, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000, 5 — 2500, 6 — 3000, 7 — 3500 об/мин; 8 — остаточная жидкость после цикла центрифугирования

Fig. 3. Ratio of contents of lithophile elements (I and II), siderophile elements (III), sulfophile elements (IV) in snow water in the ore zone. а and b — samples 2-9 and 2-12 taken at levels of 23–28 and 8–13 cm from the soil surface, respectively; 1–7 — centrifugates obtained at different centrifuge rotation speeds, where: 1 — 500, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000, 5 — 2500, 6 — 3000, 7 — 3500 rpm; 8 — residual liquid after the centrifugation cycle

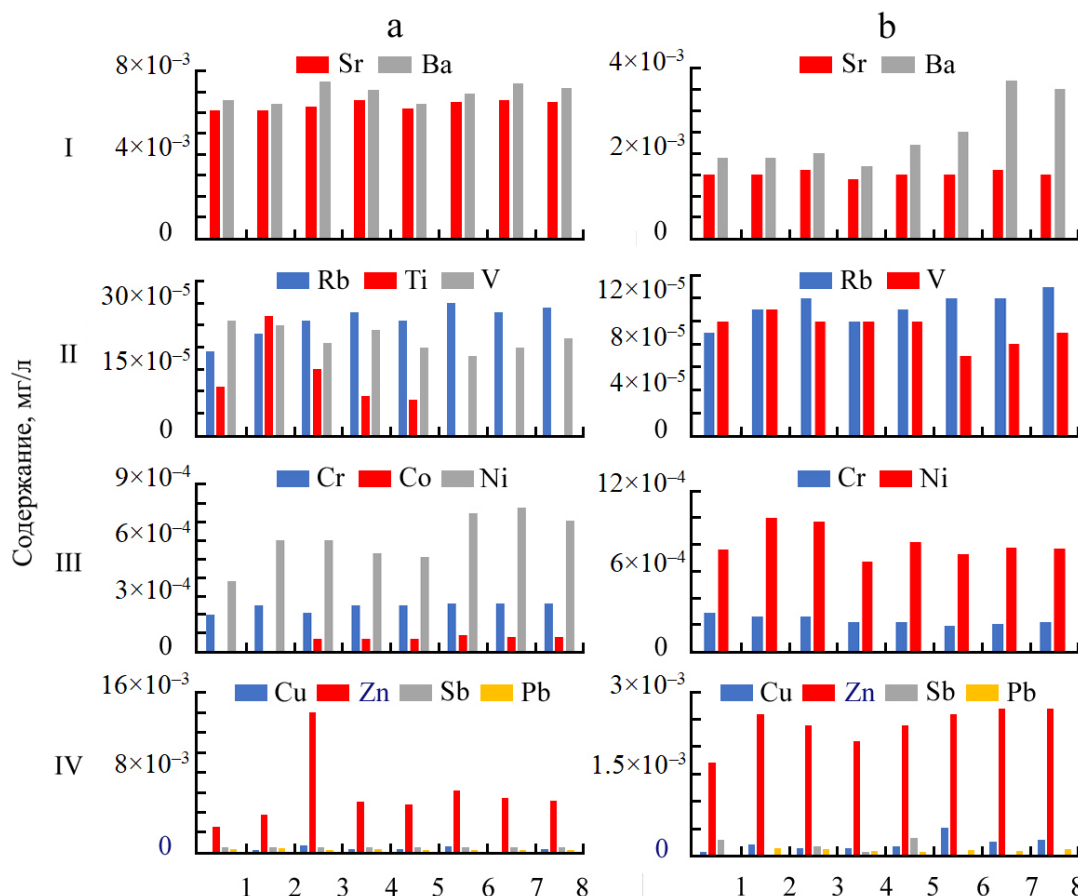


Рис. 4. Соотношение содержаний элементов-литофилов (I и II), элементов-сидерофилов (III) и элементов-сульфофилов (IV) в снеговой воде в безрудной зоне. а и б — пробы 4-14 и 4-16, взятые на уровнях 31–36 и 11–16 см от почвенной поверхности соответственно; 1–7 — центрифугаты, полученные при разной скорости вращения центрифуги: 1 — 500, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000, 5 — 2500, 6 — 3000, 7 — 3500 об/мин; 8 — остаточная жидкость после цикла центрифугирования

Fig. 4. Ratio of lithophile elements (I and II), siderophile elements (III), and sulfophile elements (IV) in snow water in the ore-free zone. a and b — samples 4-14 and 4-16 taken at levels of 31–36 and 11–16 cm from the soil surface, respectively; 1–7 — centrifugates obtained at different centrifuge rotation speeds, where: 1 — 500, 2 — 1000, 3 — 1500, 4 — 2000, 5 — 2500, 6 — 3000, 7 — 3500 rpm; 8 — residual liquid after the centrifugation cycle

содержание Ba, Ni, Rb, Cu в центрифугатах проб 4-14 и 4-16 увеличивается с ростом вращения скорости центрифуги, при этом граница изменения содержания отмечается в центрифугатах начиная с отметки 2500 об/мин. И эти изменения, как и первом случае, связаны с увеличением в центрифугатах доли средней и мелкой фракций (табл. 5). При этом элементы-примеси, входящие в состав крупных фракций (например, Ti в пробе 4-14 и Sb в пробе 4-16), перестают фиксироваться в центрифугатах, полученных при больших скоростях вращения центрифуги.

Обращает на себя внимание динамика содержания Zn. Как и в пробах, взятых в пределах рудной зоны, высокие содержания данного элемента устойчиво фиксируются во всех центрифугатах со значительным превышением относительно других элементов-сульфофилов. Причина та же, что и в первом случае — усиление сигнала вызвано загрязнением снега автомобильными выхлопами.

Однако в целом можно сказать, что метод ступенчатого центрифугирования может рассматриваться как вспомогательный прием при сравнительной характеристике распределения элементов-примесей в снеговой воде при изучении химического состава снежного покрова, формирующегося в пределах рудного поля. Но при этом необходимо принять во внимание воз-

можность затухания полезного сигнала рудной аномалии наложением другого сигнала, связанного с атмосферным загрязнением снега. В связи с этим возникает проблема: как отличить полезный сигнал рудной аномалии от флуктуаций природного геохимического фона? При том что на эти флуктуации может оказывать влияние зимнее аэрозольное поле, формирование которого связано не только с дальним переносом влажностенных воздушных масс, но и с локальными переносом оловопы (Евсеева и др., 2020). В рамках данной работы указанная проблема решается нормированием значений концентраций индикаторной группы элементов-примесей с использованием алюминия — тероморфного элемента литосферы (рис. 5).

Механизм концентрирования элементов-примесей кристаллами глубинной изморози

Следует заметить, что снежные разрезы закладывались в пределах рудной и безрудной зон. В каждом разрезе опробованию подвергался приконтактный с почвой снежный слой, в котором отбирались по две пробы: первая — в его верхней части, а вторая — в нижней. Сам слой опробования¹ отличается от вышележа-

¹ Обоснование выбора данного слоя приведено в работе (Тентюков и др., 2022)

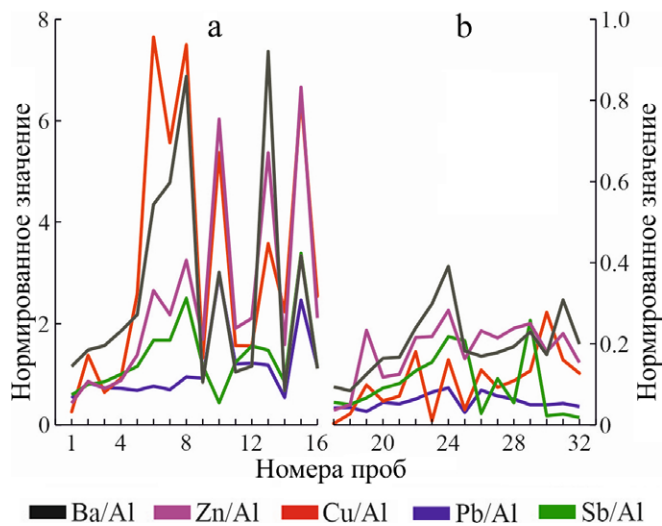


Рис. 5. Сравнение сигнала накопления рудных элементов в центрифугатах проб глубинной изморози, взятых в пределах рудной (а) и безрудной (б) зон на Турунтаевской площади

Fig. 5. Comparison of the signal of accumulation of ore elements in centrifugates of deep hoar samples taken within the ore (a) and ore-free (b) zones in the Turuntaevskaya area

щих наличием крупных кристаллов глубинной изморози (рис. 6).

Формирование кристаллов глубиной изморози в приконтактном с почвой снежном слое связано с существованием особой кристаллообразующей среды, для которой характерно наличие определенных параметров, обеспечивающих генерирование условий для зарождения данных кристаллов. Дальнейший рост кристаллов происходит в результате неоднократной перекристаллизации, поддерживаемой постоянным диффузионным массопереносом почвенной влаги. Процесс сопровождается относительным увеличением содержания легкорастворимых соединений элементов-примесей за счет их диффузионного переноса в составе паров почвенной влаги в приконтактный с почвой слой снега.

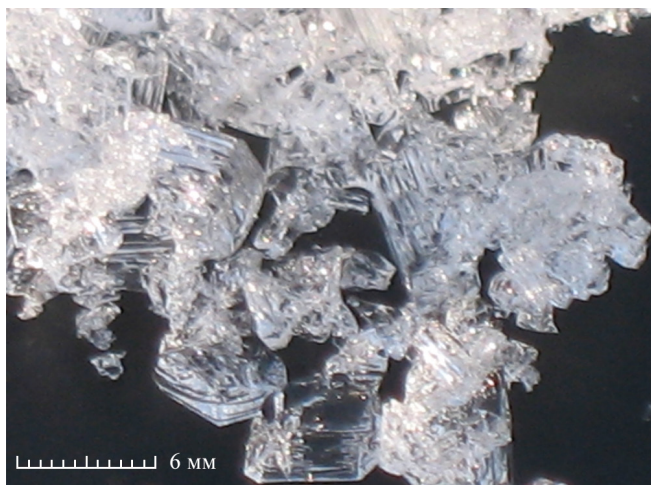


Рис. 6. Ледяные пирамидальные кристаллы глубинной изморози со штриховкой Фореля на гранях (фото М. П. Тентюкова)

Fig. 6. Ice pyramidal crystals of deep hoar frost with Forel's shading on the edges (photo by M. P. Tentyukov)

Но как при этом закрепляются элементы-примеси в ледяной матрице снежной толщи, когда в ней непрерывно протекают процессы сублимации и поры снега как ледяной осадочной породы всегда насыщены поровой влагой? При этом возможность проникновения элементов-примесей в кристаллическую структуру ледяной матрицы при фазовых переходах воды в процессе массообмена между ледяной матрицей снега, водяным паром и конденсированной (капиллярной) жидкостью полностью исключается.

Тогда как же формируются геохимические аномалии в снежной толще? Их появление связано с микрофизическими свойствами снега, которыми обладают эпитаксиальные пленки на поверхности ледяных кристаллов снежных зерен. Появление такой пленки инициируется микропроцессами на границе раздела фаз (газ $\leftrightarrow$ жидкость $\leftrightarrow$ кристалл), что усиливает сигнал концентрирования элементов-примесей в снежных зернах. Появление данного сигнала обусловлено наличием эпитаксиальной пленки, механизм формирования которой на поверхности ледяных зерен вызван следующим.

Известно, что в соответствии с законом Рауля присутствие растворенного вещества будет снижать точку замерзания воды пропорционально молярной концентрации растворенного вещества. Охлаждение разбавленного раствора при температуре ниже 0 °C вызовет кристаллизацию льда и фазовое разделение раствора. Последнее инициирует начало и развитие процесса криохимического фракционирования раствора. При дальнейшем снижении температуры количество объемного льда увеличивается, а вместе с ним растет и концентрация растворенного вещества. Процесс фазового разделения идет до тех пор, пока не будет достигнута эвтектическая концентрация и температура. В данной точке растворенное вещество и остальной растворитель кристаллизуются и выпадают в осадок в виде взаимопроникающих областей растворенного вещества и льда, т. е. образуют *клатратное соединение* (Глинка, 1987). В связи с этим надо заметить, что при формировании геохимической аномалии в снежной толще в этом взаимодействии важным является то, что в криогенном новообразовании определяющую роль играет не реакционная способность компонентов, а пространственное соответствие областей (комплементарность) окристаллизованного растворенного вещества и чистого объемного льда ледяной матрице. Предполагается, что клатраты на поверхности ледяного кристалла снега могут образовывать клатратный эпитаксиальный слой.

Эпитаксия и формирование геохимических аномалий в снежном покрове

Эпитаксия — это закономерное срастание кристаллов веществ различного состава, связанное с близостью строения их кристаллических структур (Геологический словарь, 1978). Термин «эпитаксия» был введен в 1928 году Л. Руае (L. Royer) для обозначения ориентированного нарастания одного вещества на кристаллической поверхности другого (Палатник, Папилов, 1964; Stress and Strain in Epitaxy..., 2001). В современной литературе эпитаксию часто классифицируют исходя из кристаллографических параметров подложки и пленки, при этом последнюю называют

эпитаксиальной. Если материал и кристаллическая структура подложки и пленки идентичны, процесс называют автоэпитаксиальным или гомоэпитаксиальным.

Автоэпитаксия является также частным случаем параллельного срастания кристаллов. При автоэпитаксиальном срастании на взрослом кристалле зарождаются и растут кристаллы нового поколения, но того же самого минерала, что и подложка. Примером могут быть сростки кристаллов поверхностного инея при образовании пирамидальных (рис. 7, а) и игольчатых (рис. 7, б) форм.

Если же химический состав подложки отличается от состава эпитаксиальной пленки, то они обусловлены гетероэпитаксиальным процессом. Но и в этом случае структуры решеток пленки и подложки должны быть сходными для обеспечения роста монокристаллического слоя на поверхности подложки (Палатник, Папилов, 1971). Можно предполагать, что в обоих случаях и появление, и рост эпитаксиальной пленки будет обеспечиваться клатратами.

Заметим, что эпитаксия относится к такому типу осаждения вещества, когда новые кристаллические слои формируются с определенной ориентацией по отношению к кристаллической подложке (ледяной матрице). Во время этого процесса на границе растущего слоя возможна имплантация примесей с низкой растворимостью. Поскольку образование клатратов происходит при криогенной дегидратации субохлажденного раствора, то эпитаксиальная клатратная пленка представляет собой двухфазную систему, состоящую из тонкой смеси кристаллов солей и льда. При этом оптическая плотность чистого объемного льда и эвтектической смеси из взаимопроникающих областей окристаллизованного растворенного вещества и льда будет разной. На поверхности граней ледяных кристаллов изморози в отраженном свете эти зоны наблюдаются в виде чередования полосок — штриховки Фореля (рис. 7, с).

Закключение

В ходе проведения снегометрической съемки в пределах Турунтаевского рудопоявления по установлению зависимости элементного состава примесей от их гранулометрических характеристик для проб глубинной изморози, взятых в нижней части шурфов, бы-

ла проведена процедура ступенчатого центрифугирования снеговой воды. Изучение изменчивости элементного состава центрифугатов снеговой воды, полученных при разных скоростях вращения центрифуги, выявило определенную зависимость состава элементов-примесей от их гранулометрических характеристик. Анализ соотношения размерных фракций в пробах глубинной изморози, взятых над рудной зоной, показал, что практически во всех центрифугатах сильно преобладает доля крупных частиц. В то же время для безрудной зоны в центрифугатах после режима 2000 об/мин доля крупных частиц относительно центрифугатов, полученных при меньших скоростях вращения, уменьшается в кратном размере. В целом можно считать, что ступенчатое центрифугирование снеговой воды в сопряжении с методами динамического рассеяния света и МС-ИСП может рассматриваться как дополнительный методический прием, позволяющий повысить информативность результатов геохимического пробоваания снежного покрова при поисках глубокозалегающих рудных тел.

Исследования механизма концентрирования элементов-примесей кристаллами глубинной изморози показали, что особенности формирования данных кристаллов в приконтактном с почвой снежном слое связано с существованием особой кристаллообразующей среды, для которой характерно наличие определенных параметров, обеспечивающих генерирование условий для зарождения таких кристаллов. Дальнейший рост кристаллов глубинной изморози происходит в результате неоднократной перекристаллизации ледяных кристаллов, поддерживаемой постоянным диффузионным массопереносом почвенной влаги. При этом усиление сигнала геохимической аномалии, формирующейся в нижней части снежной толщи, обусловлено относительным ростом легкорастворимых соединений элементов-примесей за счет их диффузионного переноса в составе паров почвенной влаги в приконтактный с почвой слой снега.

Иначе говоря, особенности концентрирования элементов-индикаторов рудной залежи в приконтактном с почвой в слое глубинной изморози во многом определяются микрофизическими свойствами снега, а усиление геохимической аномалии — активностью фазовых переходов (газ ↔ жидкость ↔ кристалл) при формировании кристаллов глубинной изморози в зоне контакта «снег — почва».

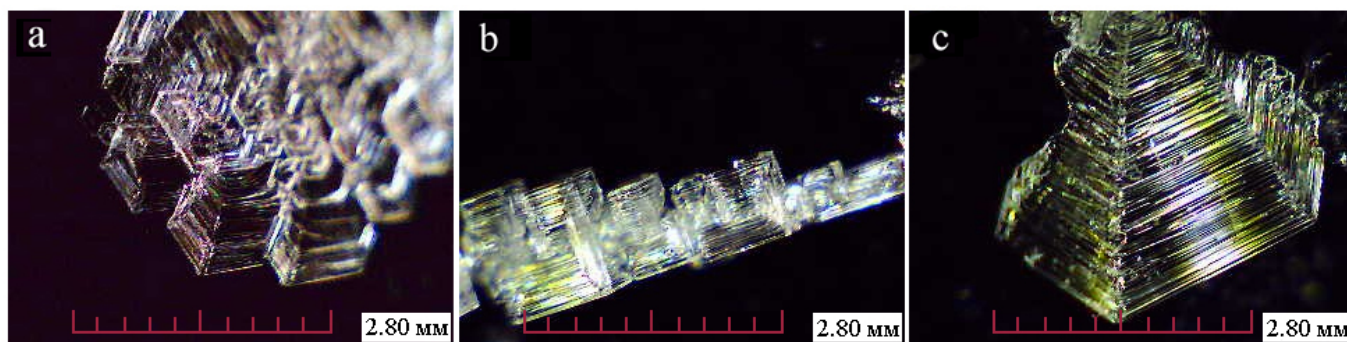


Рис. 7. Морфология пирамидальных (а) и игольчатых (б) агрегатов, образованных сростками кристаллов поверхностного инея. Отдельный пирамидальный кристалл (с) со штриховкой Фореля на гранях (микрофото М. П. Тентюкова)

Fig. 7. Morphology of pyramidal (a) and needle-shaped (b) aggregates formed by intergrowths of surface frost crystals. A separate pyramidal crystal (c) with Forel's shading on the edges (microphoto by M. P. Tentyukov)



Установлено, что устойчивость сигнала геохимической аномалии в слое глубинной изморози обусловлена наличием криогенного новообразования — клатратного соединения, формирующегося на поверхности ледяного кристалла. Данное образование представляет собой эвтектическую смесь в виде взаимопроникающих областей растворенного вещества и льда. Обоснованно постулируется, что клатраты на поверхности ледяного кристалла снега могут образовывать клатратный эпитаксиальный слой. Предложена феноменологическая модель эпитаксиального механизма формирования геохимических аномалий в снежной толще, позволяющая по-новому организовать проведение геохимических поисков глубокозалегающих рудных тел по снежному покрову.

Литература / References

- Булах А. Г. Микромир минералов: границы, объекты, явления // Записки ВМО. 1998. № 5. С. 124–134.
Bulakh A. G. Microworld of minerals: boundaries, objects, phenomena. Proc. RMS. 1998, No. 5, pp. 124–134. (in Russian)
- Гаврилов Р. Ю., Соболев И. С., Соболева Н. П., Ворошилов В. Г., Тентюков М. П. Апробация снежной и атмогеохимической съемок для картирования ореолов рассеяния погребенной полиметаллической минерализации на примере Турунтаевского рудопоявления (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 1. С. 126–135.
Gavrilov R. Yu., Sobolev I. S., Soboleva N. P., Voroshilov V. G., Tentyukov M. P. Testing of snow and atmogeochemical surveys for mapping dispersion halos of buried polymetallic mineralization using the example of the Turuntaevskoye ore occurrence (Tomsk region). Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2023, V. 334, No. 1, pp. 126–135. (in Russian)
- Гамянин Г. Н., Жданов Ю. Я., Моисеенко В. Г. Природные и техногенные сфероиды минералов // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. № 4. С. 52–60. URL: https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/23424/Gamyan_00.pdf.
Gamyranin G. N., Zhdanov Yu. Ya., Moiseenko V. G. Natural and technogenic mineral spheroids. Pacific Geology, 2000. V. 19, No. 4, pp. 52–60. URL: https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/23424/Gamyan_00.pdf (in Russian).
- Евсеева Н. С., Язиков Е. Г., Квасникова З. Н., Батманова А. С., Бучельников В. С. Современный эоловый морфолито-генез: изученность, региональные проявления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 11. С. 96–107.
Evseeva N. S., Yazikov E. G., Kvasnikova Z. N., Bat'manova A. S., Buchel'nikov V. S. Modern aeolian morpholithogenesis: state of study, regional manifestations. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering, 2020, V. 331, No. 11, pp. 96–107. (in Russian)
- Колотов Б. А., Киселева Е. А., Рубейкин В. З. К вопросу о вторичном рассеянии рудных месторождений // Геохимия. 1965. № 7. С. 878–880.
Kolotov B. A., Kiseleva E. A., Rubeykin V. Z. Secondary dispersion of ore deposits. Geochemistry, 1965, No. 7, pp. 878–880. (in Russian)
- Новгородова М. И., Андреев С. Н., Самохин А. А., Гамянин Г. Н. Кавитационные эффекты в образовании минеральных микросферул в гидротермальных растворах // Доклады академии наук. 2003б. Т. 389(5). С. 669–671.
Novgorodova M. I., Andreev S. N., Samokhin A. A., Gamyranin G. N. Cavitation effects in the formation of mineral microspherules in hydrothermal solutions. Doklady Earth Sciences, 2003b, V. 389(5), pp. 669–671. (in Russian)
- Новгородова М. И., Гамянин Г. Н., Жданов Ю. Я., Агаханов А. А., Дикая Т. В. Микросферулы алюмосиликатных стёкол в золотых рудах // Геохимия. 2003а. № 1. С. 83–93.
Novgorodova M. I., Gamyranin G. N., Zhdanov Yu. Ya., Agakhanov A. A., Dikaya T. V. Microspherules of aluminosilicate glasses in gold ores. Geochemistry, 2003a, No. 1, pp. 83–93. (in Russian)
- Патент на полезную модель № 220628. Российская Федерация, МПК G01N 1/04 (2006.01). Устройство для отбора проб снега: № 2023116507: заявл. 23.06.2023: опубл. 26.09.2023. Бюлл. № 27 / Гаврилов Р. Ю., Соболев И. С., Тентюков М. П., Язиков Е. Г.; заявитель ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». 8 с.
Patent for Utility Model No. 220628 Russian Federation, IPC G01N 1/04 (2006.01). Snow sampling device: No. 2023116507: declared 23.06.2023: published 26.09.2023. Bulletin No. 27. Gavrilov R. Yu., Sobolev I. S., Tentyukov M. P., Yazikov E. G.; applicant National Research Tomsk Polytechnic University, 8 p. (in Russian)
- Палатник Л. С., Папилов И. И. Эпитаксиальные пленки. М.: Наука, 1971. 480 с.
Palatnik L. S., Papirov I. I. Epitaxial films. Moscow: Nauka. 1971, 480 p. (in Russian)
- Палатник Л. С., Папилов И. И. Ориентированная кристаллизация. М.: Metallurgiya, 1964. 408 с.
Palatnik L. S., Papirov I. I. Oriented crystallization. Moscow: Metallurgy, 1964, 408 p. (in Russian)
- Парначев В. П., Парначев С. В. Геология и полезные ископаемые окрестностей г. Томска. Томск: Томский государственный университет, 2010. 144 с.
Parnachev V. P., Parnachev S. V. Geology and useful minerals of the environs of Tomsk. Tomsk State University, Tomsk, 2010, 144 p. (in Russian)
- Погребняк Ю. Ф., Татьянакина Э. М., Толочко В. В. Ореолы рассеяния золота в снежном покрове на поверхности рудопоявления // Доклады АН СССР. 1979. Т. 245. № 4. С. 953–955.
Pogrebnyak Yu. F., Tatyankina E. M., Tolochko V. V. Gold dispersion halos in snow cover on the surface of an ore occurrence. Doklady Earth Sciences, 1979, V. 245, No. 4, pp. 953–955. (in Russian)
- Соболев И. С. О возможности изучения элементного состава снежного покрова при геохимическом картировании зон и областей внедрения глубинных флюидов (нефтегазопроисводческий аспект) // Геология нефти и газа. 2013. № 1. С. 68–77.
Sobolev I. S. The possibility of studying the elemental composition of snow cover during geochemical mapping of zones and areas of deep fluid introduction (oil and gas exploration aspect). Geology of oil and gas, 2013, No. 1, pp. 68–77. (in Russian)
- Тентюков М. П., Игнатьев Г. В., Соболев И. С., Гаврилов Р. Ю. Физические свойства снежного покрова и механизм формирования геохимических барьеров в снежной

- толще // Вестник геонаук. 2022. 5(329). С. 26–37. DOI: 10.19110/geov.2022.5.4.
- Tentyukov M. P., Ignatiev G. V., Sobolev I. S., Gavrilov R. Yu. Physical properties of snow cover and the mechanism of formation of geochemical barriers in the snow layer. *Vestnik of Geosciences*, 2022, 5(329), pp. 26–37. DOI: 10.19110/geov.2022.5.4. (in Russian)
- Юшкин Н. П. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества и проблемы наноминералогии // Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. СПб., 2005. С. 10–61.
- Yushkin N. P. Ultra- and microdispersed state of mineral matter and problems of nanomineralogy. *Nanomineralogy. Ultra- and microdispersed state of mineral matter*. St. Petersburg, 2005, pp. 10–61. (in Russian)
- Etiope G., Martinelli G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2002. № 12. P. 185–204
- Jonasson I. R., Allan R. J. Snow: a sampling medium in hydrogeochemical prospecting in temperature and permafrost regions. In Jones, M. J. (Ed.), *Geochemical Exploration 1972*. London, Institution of Mining and Metallurgy. 1973. P. 161–176.
- Kristiansson K., Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of ^{222}Rn in the ground and new physical model for the transport. *Geophysics*. 1982. V. 47 (10). P. 1444–1452.
- Kristiansson K., Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition. *Geoexploration*. 1987. V. 24, P. 517–534.
- Kristiansson K., Malmqvist L., Persson W. Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations. *Endeavour, New Series*. 1990. V. 14 (1), P. 28–35.
- Lu M., Cao J., Hu G., Wang Z., Ma S. Widespread nearly or nanoscale natural amorphous particles in critical zones from ore deposits. *Ore Geology Reviews*. 2023. Vol. 157. 105454.
- Nanoparticles and the Environment* // Ed. J.F. Banfield, A Navrotsky // *Rev. Miner. A geo chem*. 2001. V. 44.
- Price L. C. A critical overview and proposed working model of surface geochemical exploration. In: Davidson, M. J. (Ed.), *Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas*. Southern Methodist University Press, Dallas, TX. 1986. P. 254–304.
- Sobolev I. S., Bredikhin N. P., Bratec T., Falk A. Yu., Tolkachev O. S., Rikhvanov L. P., Tishin P. A. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration. *Applied Geochemistry*. 2018. V. 95. P. 33–44.
- Sobolev I. S., Gavrilov R. Yu., Isupova A. A., Khvashevskaya A. A., Tolkachev O. S., Baranovskaya N. V., Soboleva N. P. Geochemical studies of snow over mineral accumulations under conditions of their overlap by sedimentary rocks of the platform cover. *Journal of Geochemical Explorations*. 2022. V. 234. 106940.
- Stress and Strain in Epitaxy: Theoretical Concepts, Measurements and Applications* / Edited by M. Hanbücken, J.-P. Deville. Elsevier Science, 2001. 326 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50865-2.X5000-4>.
- Taivalkoski A., Sarala P., Lukkari S., Sutherland D. Snow in mineral exploration – examples and practices in glaciated terrain. *Journal of Geochemical Explorations*. 2019. V. 200 (5). P. 1–12.
- Wei X., Cao J., Holub R. F., Hopke P. K., Zhao S. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province, South China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2013. V. 128, P. 124–135.

Поступила в редакцию / Received 09.08.2024

**Из опыта преподавания.****XVI. Минеральные ассоциации: смежность, парагенезис, парастерезис.
К 260-летию со дня рождения В. М. Севергина****Ю. Л. Войтеховский**

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

Российское минералогическое общество, Санкт-Петербург, Россия

vojtekhovskij@herzen.spb.ru

В статье рассмотрена история возникновения концепции парагенезиса в минералогии и петрографии. Выполнено сравнение понятий «смежность» В. М. Севергина и «парагенезис» А. Брейтгаупта, сняты противоречия в дискуссии о приоритете. Исследован вопрос о генетических (каузальных), парагенетических, парастерических и случайных (коррелированных) отношениях между минеральными ассоциациями. Показана важность знания истории науки и, соответственно, чтения первоисточников. Статья предназначена преподавателям и студентам геологических факультетов университетов, но может быть использована учителями общеобразовательных школ на факультативных уроках. Текст сопровождается редкими фото из архива профессора Д. П. Григорьева в Российском минералогическом обществе.

Ключевые слова: смежность, генезис, парагенезис, парастерезис, гомогенетические и гетерогенетические минеральные ассоциации, В. М. Севергин, А. Брейтгаупт

From teaching experience.**XVI. Mineral associations: contiguity, paragenesis, parasteresis.
Celebrating the 260th anniversary of the birth of V. M. Severgin****Yu. L. Voytekhovsky**

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

Russian Mineralogical Society, St. Petersburg, Russia

The article reviews the history of the concept of paragenesis in mineralogy and petrography. The concepts of «contiguity» by V. M. Severgin and «paragenesis» by A. Breithaupt are compared, contradictions in the discussion of priority are removed. The genetic (causal), paragenetic, parasteric and random (correlated) relationships between mineral associations are studied. The importance of knowledge of the history of science and accordingly reading primary sources is stressed. The article is intended for teachers and students of geological faculties of universities, but can also be used by teachers of secondary schools in optional lessons. The text is accompanied by rare photos from the archive of Professor D. P. Grigoriev placed in the Russian Mineralogical Society.

Keywords: contiguity, genesis, paragenesis, parasteresis, homogeneous and heterogeneous mineral associations, V. M. Severgin, A. Breithaupt

Введение

Базовые понятия минералогии, в том числе минерального вида и индивида, предложенные еще К. Линнеем, активно обсуждались во второй половине XX века в связи со становлением онтогенетической парадигмы (Григорьев, 1961; Григорьев, Жабин, 1975; Жабин, 1979 и др.). За прошедшие полвека эта дисциплина далеко вторглась в «пограничье минерального мира» (Юшкин, 1992). И вот ясное определение минерального вида как природного (без малейшего участия человека) химического соединения (с естественными границами непрерывных серий) с кристаллической структурой (никаких осей симметрии 5-го порядка и прочих «квази») уже оспаривается во всех пунктах, главным образом ради «умножения сущностей (минеральных видов) без надобности» вопреки логическому принципу экономии (*lex parsimoniae*).

Понятие парагенезиса — тоже из числа базовых (Бетехтин, 1949, 1951; Коржинский, 1957; Петровская, 1967, 1978; Шадлун, 1967; Жариков, 1968; Prösler, Wolf, 1969; Васильев и др., 1972; Иванов, 1972; и др.). Рожденное в минералогии и петрографии, сегодня оно используется и в других естественных науках: структурной геологии, фациальном анализе, геоморфологии, почвоведении, ботанике, экологии и др. — поскольку схватывает важные отношения в живой и неживой природе. Переходя из одной дисциплины в другую, оно изменялось и перекрывалось с близкими понятиями, к тому же не всегда в точном переводе с одного языка на другой. Чистота научного языка, избегание плеоназмов и прочих пороков стиля — важная гигиеническая проблема любой науки.

Понятие парагенезиса обременено досадной дискуссией о приоритете В. М. Севергина (1765–1826) или

А. Брейтгаупта (1791–1873), начатой короткой заметкой (Седлецкий, 1948). Так небольшой толчок вызывает разрушительную лавину.

«В геолого-минералогических кругах утвердился взгляд, что учение о парагенезисе минералов впервые сформулировал немецкий ученый Брейтгаупт в 1849 году в своей работе „Парагенезис минералов“ (см., напр., Ф. Ю. Левинсон-Лессинг и Э. А. Струве, 1937; А. С. Уклонский, 1940, с. 71). Это устоявшееся мнение, однако, не соответствует действительности. Раньше Брейтгаупта на целых 50 лет учение о парагенезисе минералов было сформулировано русским ученым В. М. Севергиным. <...> Смежность минералов есть то же, что и парагенезис минералов <...>».

Лишь незнанием истории русской минералогии и забвением русских работ можно объяснить распространенное представление, будто лишь начиная с Брейтгаупта возникло учение о парагенезисе минералов. <...> Знал ли Брейтгаупт работы В. М. Севергина? Все работы последнего, начиная с „Первых оснований минералогии“, широко, наравне с другими печатными академическими изданиями, рассылались за границу. В. М. Севергин и сам лично посылал свои труды многим зарубежным ученым. И Брейтгаупт, который начал работать значительно позже В. М. Севергина, почти наверное знал о его работах и его учении о смежности минералов. Восприняв это учение, придав ему другое название, немецкий ученый опубликовал его в 1849 году как свое открытие, замалчивая своего русского предшественника» (Седлецкий, 1948, с. 37–38).

Очевидно, дух статьи отвечал недавним победам на фронтах Второй мировой. Это можно понять — когда соревнуются мировые системы, нюансы в расчет не идут. Но упрек в плагиате в адрес А. Брейтгаупта — клевета, которую следует категорически отринуть, ибо «почти наверное знал» не доказательство.

Наша методическая статья имеет две цели: во-первых, осветить коллизию «Севергин или Брейтгаупт» и расставить правильные акценты с опорой на перво-

источники; во-вторых, показать, что объяснять понятие парагенезиса в курсе минералогии удобно именно в связи с интригующей историей. Статья приурочена к 260-летию В. М. Севергина, биография которого полно освещена историками науки (Бокий, Шафрановский, 1947; Григорьев, Шафрановский, 1949; Шафрановский, 1962; Šafranovskij, Grigor'ev, 1979; Ушакова, Фигуровский, 1981).

Читаем В. М. Севергина

В. М. Севергин (рис. 1, 2) несколько раз упоминает «смежность» еще до определения понятия. «§ 6. Случаи, кои при каждом ископаемом теле примечать надлежит. При рассматривании ископаемых тел надлежит примечать: 1) признаки их, свойства и составляющие части, 2) наименования, 3) систематический порядок, 4) местоположение и **смежность** (здесь и далее выделено нами. — Ю. В.) с другими минералами, 5) место рождения, 6) пользу и употребление, 7) происхождение и образование, 8) историю и писателей» (Севергин, 1798, кн. 1, с. 4). Итак, «смежность», «происхождение и образование» разнесены, т. е. суть не одно и то же.

«§ 8. Разные роды признаков. Таковые признаки определяются четырьмя способами: 1) по месту, где ископаемые тела добываются, по **смежности** их с другими породами (здесь и далее „порода“ не горная порода в современном понимании, а сорт, вид, тип минерала; горные породы определены в кн. 2 как „смешанные породы“ — Ю. В.) и по другим случайным обстоятельствам...» (Там же. С. 6). Здесь не ясно, «смежность с другими породами» — закономерное или случайное обстоятельство или случайны только «другие» обстоятельства.

«§ 9. Лучшие признаки. Лучшие признаки суть те, 1) кои совершенно отличают каждую породу от всех прочих и потому точно показывают существенную разность между ископаемыми телами, 2) кои со всею точностью знать и определить можно, 3) кои скорее и лег-

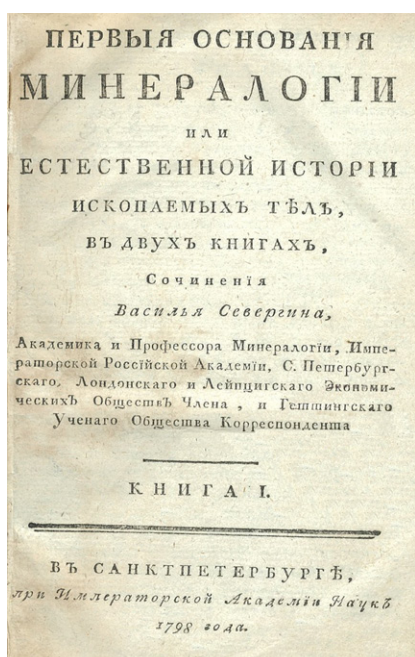


Рис. 1. В. М. Севергин и титульный лист «Первых оснований минералогии...» (1798)

Fig. 1. V. M. Severgin and the title page of «The first foundations of mineralogy...» (1798)



Рис. 2. Зал общей минералогии в музее Ленинградского горного института (ныне Санкт-Петербургский горный университет). Экспозиция подготовлена под руководством профессора А. К. Болдырева к международному геологическому конгрессу 1937 г. Периодическая таблица с плотнейшими упаковками химических элементов утрачена. Сегодня это зал онтогении минералов с демонстрациями понятий «смежность» и «парагенезис» в образцах. Редкое фото из архива профессора Д. П. Григорьева

Fig. 2. The Hall of General Mineralogy in the Museum of the Leningrad Mining Institute (now St. Petersburg Mining University). The exposition was prepared under the guidance of Professor A. K. Boldyrev for the International Geological Congress of 1937. The periodic table with the densest packages of chemical elements has been lost. Today it is the Hall of Mineral Ontogeny with demonstrations of the concepts of contiguity and paragenesis in samples. A rare photo from the archive of Professor D. P. Grigoriev

че приискать и 4) кои без разрушения тела определить можно. Первые два свойства имеют наипаче химические, а последние, не отрицая совсем и первых достоинств, имеют преимущественно наружные признаки» (Там же. С. 6–7).

«§ 10. Ненадёжные признаки. Ненадёжные признаки суть все те, кои заимствуются от места, где ископаемые тела добываются, от **смежности** их с другими породами и вообще от всех случайных обстоятельств» (Там же. С. 7). Из § 9 и 10 следует, что для диагностики ископаемого тела (минерала) его смежность с другими ископаемыми телами (минералами) не лучший признак, ибо может быть случайным.

Определение дано после перечисления диагностических свойств минералов. «§ 96. **Смежность** минералов. **Смежностью** минералов называю я совокупное пребывание двух или многих минералов в каком-либо месте, которое заслуживает особенного примечания. Напр. сопребывание кварца с слюдой, с самородным золотом и проч. известного [известкового] шпата со свинцовым блеском, с самородным серебром и проч., мрамора с самородною медью, а шифера [сланца] с медною зеленью и колчеданом и пр., когда напротив того сей же шифер редко или почти никогда не содержит серебра, мрамор – золота, гипс же некоторого не содержит из помянутых металлов, и т. д., чему приводимы будут подробные примеры ниже сего при описании пород (в кн. 2. — Ю. В.). Зависит ли сие единственно от позднейшего или юнейшего образования или также и от самого внутреннего смешения различных пород земель и камней, должны решить будущие времена. Многие из таковых сопребываний случайны. Железные охры суть те породы, кои

с наибольшею частью других металлов соединены бывают. (Два последних предложения о случайных смежностях в статье И. Д. Седлецкого удалены из цитаты без пояснений не случайно, ибо они убивают его аргументы. — Ю. В.) Усовершенствование таковых замечаний, то есть какая порода, при каких обстоятельствах, какие тела и в каком виде наипаче содержит, облегчила бы самое приискание руд и цветных камней» (Там же. С. 85–86).

«Позднейшее или юнейшее образование» — это, вероятно, закономерное новообразование одних минералов по другим, например «железных охр» по железосодержащим минералам, малахита и азурита — по медьсодержащим и т. д. «Само внутреннее смешение различных пород, земель и камней» — это, по-видимому, ассоциация минералов, образовавшихся из одного субстрата (расплава или раствора, внутри которых они были когда-то смешаны) в едином процессе, например, «кварца с слюдой, с самородным золотом <...> известного [известкового] шпата со свинцовым блеском, с самородным серебром».

Озадачивает фраза «многие из таковых сопребываний случайны». Видимо, В. М. Севергин допускал, что некоторые «смежности», принимаемые им в одном из указанных смыслов, таковыми не являются — это «должны решить будущие времена». Допустить, что «смежности» могут быть абсолютно случайными, необъяснимыми в рамках принципа причинности, нельзя, ибо это отрицает их смысл как сонахождений минералов, «которые заслуживают особенного примечания».

Из примеров смежностей минералов дадим описания самородного золота и касситерита. «В таковых

видах попадает золото наипаче в кварце в Березовских екатеринбургских золотых промыслах и в премногих других местах. Сверх того встречается оно также: в тяжелом шпате [барите] в Змеиногорске, в плавики [флюорите] там же, в бурой охре в Березовских промыслах, в охряной железной руде там же, в колчедане [пирите] там же и близ Фачебая в Венгрии, резном камне [статите] в Циллертале, в известном [известковом] шпате [кальците] близ Станицы, в селените близ Бойцы и Станицы, в черноземе, в леттене [песчаной глине] в Богемии, в трапе [аргиллите] там же, в металлической матке [сульфидах железа, меди, никеля] близ Бойцы, в полевом шпате близ Шемница, в роговом камне [орлеце] в Змеевской горе, в яшме, в горновом камне [кварц-слюдяном сланце] в Испании, с молибденою, с мышьяком близ Станицы, с сюрмою там же, с блендою (общее название для многих обманок: цинковая б. — сфалерит, роговая б. — роговая обманка и т. д. — Ю. В.) близ Бойцы и Станицы, в железном камне близ Догнаски, с горною синью [азурином] в Змеевской горе, со свинцовым блеском близ Бойцы и Салатны, с белою и красною серебряною рудою в Кремнице, с стекловатою серебряною рудою в Шемнице, на роговой серебряной руде в Черепановском руднике в Колыванских заводах, в виде песку на Оке близ Муромы, во многих Бухарских и в премногих реках других земель, как то в Семиградской области, в Венгрии, Богемии, Австрии, Краине, на Рейне, в Испании и Франции, в реках африканских и американских» (Севергин, 1798, кн. 2, с. 58–59).

«Оловянный камень [касситерит] находится редко и в немногих странах света, наипаче в черноземе, каменном мозге [валяльной, сукновальной глине], с плавином, известным шпатом, тучняком [талковым камнем], глиною, слюдою, кварцем, апатитом и топазом, наипаче же в сложенных горных породах, как то гранит и гнейс, в Корнваллисе в Англии, на островах

Сцилли, в Мариенберге, Гейере, Альтенберге, Эренфридерсдорфе в Саксонии и в Шлакенвальде в Богемии» (Там же. С. 234).

В «прибавлении 1» В. М. Севергин вводит понятие «смешанных» или «сложенных пород» — то есть по сути и большей частью горных пород в современном понимании, но также распространенных минеральных ассоциаций. «Они состоят из разных видов и отличий выше сего описанных, различным образом между соединенных; а как они обыкновенно целые составляют горы, то называются также и сложенными горными породами» (Там же. С. 339). И далее описывает наряду с горными породами (гранитом, сиенитом, порфиром, гнейсом и др.) распространенные минеральные ассоциации, например на основе кварца: «...со слюдой, шерлом, кианитом, асбестом, венисою [гранатом], тальком, роговою блендою, шерлом и венисою, слюдою и шерлом, слюдою и роговою блендою...» (Там же. С. 339–340).

Из приведенных цитат видно, что В. М. Севергин трактовал смежность весьма широко — как понятие, охватывающее обширный спектр находений того или иного минерала в весьма разных обстановках. Среди названных смежностей есть будущие парагенезисы, по А. Брейтгаупту (золото с кварцем, пиритом, сфалеритом, антимонитом и др., касситерит с кварцем, топазом и др.), и непарагенезисы (золото с бурой охрой, азуритом, черноземом, аргиллитом, аллювиальным песком и пр., касситерит в тальке, глине и пр.).

Читаем А. Брейтгаупта

А. Брейтгаупт (рис. 3, 4) начинает книгу с определения, что очень удобно (далее в тексте пер. с нем. наш — Ю. В.). «Хотя уже давно из определенного вида совместного нахождения минералов выведены понятия некоторых горных пород или также жильных

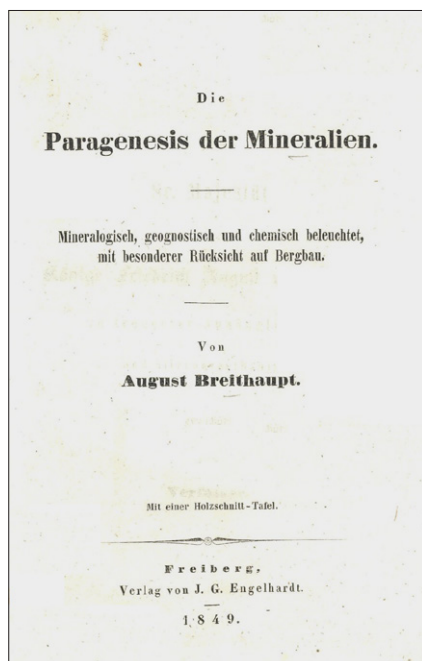


Рис. 3. А. Брейтгаупт и титульный лист «Paragenesis der Mineralien» (1849). Фото с портрета из архива профессора Д. П. Григорьева. Подпись: «А. Брейтгаупт в 1863 г. Получено от Dr. Bernstein 1962»

Fig. 3. A. Breithaupt and the title page of «Paragenesis der Mineralien» (1849). Photo from the portrait from the archive of Professor D. P. Grigoriev. Signed: «A. Breithaupt in 1863. Received from Dr. Bernstein 1962»



Рис. 4. Виды Фрайберга эпохи А. Брейтгаупта. Вверху: замок Фройденштайн, 1830; верхний рынок, 1830. Внизу: горный парад, около 1850; старое здание Горной академии, где сформулировано понятие парагенезиса. Фото из архива профессора Д. П. Григорьева. Подпись на конверте: «От профессора И. И. Шафрановского, ему подарил Бейрих из Фрайбергской академии. 17.10.1968»

Fig. 4. Views of Freiberg from the years of A. Breithaupt. Above: Freudenstein castle, 1830; upper market, 1830. Below: the miners' parade around 1850; the old building of the Mining Academy, where the concept of paragenesis was formulated. Photo from the archive of Professor D. P. Grigoriev. Signed on the envelope: «From Professor I. I. Shafranovsky, presented to him by Beirich from the Freiberg Academy. 17.10.1968»

образований, и тем самым признаны постоянные ассоциации минералов в соответствии с подходом А. Г. Вернера (1749–1817), этот предмет до сих пор не получил высшей степени внимания, которой заслуживает. Действительно, минералы, которые встречаются вместе, часто перечисляются с одним из них, но лишь в исключительных случаях при этом указывается, как, каким образом они появляются рядом, меньше всего учитывают их возрастную последовательность. Под **парагенезисом** минералов следует понимать более или менее выраженный способ совместного нахождения их ассоциации. При этом относительному возрасту тел, там, где их последовательность может быть распознана, следует придавать особое значение, так как в этом отношении лежит основное указание» (Breithaupt, 1849, с. 1). В тексте И. Д. Седлецкого перевод этой цитаты весьма вольный, но сути не искажает. И все же складывается впечатление, что автор был уверен: В. М. Севергина и А. Брейтгаупта потомки читать не станут.

«Такие существенно похожие явления, известные из весьма удалённых уголков мира, доказывают, что сообщества минералов имеют свои определённые правила, свои законы. <...> **Парагенетические** явления также доказываются многими друзьями, непосредственное совместное нахождение [минералов] определяется тем обстоятельством, что новые образования преимущественно опираются на один минерал, как бы

притягиваясь к нему, тогда как они стремились избежать других, поверхности которых были также предоставлены» (Там же. С. 3).

«Совместное нахождение минералов не всегда зависит от их одновременного образования. <...> Об одновременном образовании говорит закономерное сращивание различных минеральных видов, где и когда <...> не имеет место замещение. <...> Наконец, об одновременном образовании ещё говорит то обстоятельство, что минералы оставляют друг на друге отпечатки» (Там же. С. 13–14). Скорее всего, здесь речь идет об индукционных поверхностях.

В заключительной главе VII А. Брейтгаупт рассматривает 20 жильных парагенезисов (как и В. М. Севергин, ставя во главу основной минерал, с охватом практически наиболее важных металлов), для каждого указывая основные месторождения в Германии, реже за ее пределами в Европе и Америке, при этом до нескольких десятков описаний в порядке отложения минералов (Там же. С. 109–265). В 21-й парагенезис отнесены минеральные ассоциации с неясной на тот момент последовательностью отложения.

В связи с критикой И. Д. Седлецкого заметим, что А. Брейтгаупт в первом же абзаце предисловия ссылается на А. Г. Вернера как предтечу своего исследования. Это оправдывает отсутствие ссылки на В. М. Севергина, даже если он держал в руках его книгу, которую вряд ли читал на русском языке. Справедливости ра-

ди, тогда и В. М. Севергину следовало сослаться хотя бы на соотечественника М. В. Ломоносова (1711–1765). Ясно, что упомянуть А. Г. Вернера и Г. Бауэра (Агриколу, 1494–1555) не позволил пафос заметки.

Обратим внимание на важный общий момент у В. М. Севергина и А. Брейтгаупта. Оба имеют в виду практическую направленность минералогии. «§ 95. Замечание месторождения минералов полезно как вообще для усовершенствования теории Земли, так и для того, чтобы, ведая, какие минералы в котором месте попадают, можно было назначать полезное оным употребление в той стране, где они находятся» (Севергин, 1798, кн. 1, с. 84). «§ 97. Польза ископаемых тел явствовать будет при подробном оных описании. Надлежит замечать оную при всяком случае, а где она еще неизвестна, то стараться опытами оную изыскивать, ибо главная цель каждой науки должна быть польза оной для человеческого рода» (Там же. С. 86–87). Именно поэтому у обоих минеральные ассоциации обычно привязаны к практически важным рудным минералам. В. М. Севергин при всяком случае дает рекомендации о способах отработки и переработки руд.

Фундаментальные рассуждения у В. М. Севергина тоже есть. «Минералы подвержены общему с прочими вещами жребию; все повинуетя времени; все должно родиться, быть и умереть, и все обращается паки в тот безмерный Океан, откуда оно произведено было, так что хотя подземное богатство с одной стороны безмерно истощается, однако с другой оно чрез разрушение всех тел в природе вероятно паки обогащается» (Там же. С. 88). В одной фразе — представление о круговороте вещества и базовый принцип будущей онтогении минералов Д. П. Григорьева. Исходное восприятие минеральных ассоциаций у В. М. Севергина и А. Брейтгаупта одинаковое — это данности, повторяющиеся от места к месту в разных землях Ойкумены. Но приведенной натурфилософской констатации все же мало, чтобы считать смежность изначально нацеленной на генезис минеральной ассоциации. А. Брейтгаупт подразумевает в парагенезисе именно это, ясно обозначив акцент в термине.

Читаем современников

«Paragenesis — nannte Breithaupt die Gesetze der Association der Minerale in Gesteinen, Gängen etc. Breithaupt. Die Paragenesis der Mineralien. 1849». «Парагенезис — так Брайтгаупт назвал законы ассоциации минералов в горных породах, жилах и т. д. Breithaupt A. Die Paragenesis der Mineralien. 1849» (Loewinson-Lessing, 1893). Странно, что Ф. Ю. Левинсон-Лессинг не перевел термин *paragenesis* с греческого буквально, утопив его точный смысл «совместный генезис» в пространственных «законах ассоциации». Уже здесь заложено семя раздора. Кроме того, А. Брейтгаупт сказал мягче: «...более или менее выраженный способ совместного нахождения их [минералов] ассоциации». Законная, то есть физико-химическая, база под понятие парагенезиса будет подведена позднее (Коржинский, 1957). Тем не менее отдадим должное Ф. Ю. Левинсон-Лессингу. Именно он ввел это понятие в российский научный обиход, хотя сначала на французском и немецком языках.

«Парагенезис (Paragenesis), Брейтгаупт, 1849. — Законы ассоциации минералов в породах, жилах и т. д.; применяется и к ассоциациям (комплексам) горных пород» (Левинсон-Лессинг, Струве, 1932, с. 275; 1937, с. 236–237). В этих прижизненных изданиях на русском языке Ф. Ю. Левинсон-Лессинг не уточнил данное важное понятие, а в книге по истории петрографии (Левинсон-Лессинг, 1936) В. М. Севергин и смежность не упоминаются вовсе, парагенезис А. Брейтгаупта — лишь вскользь (Там же. С. 13).

«Парагенезисом, или природной ассоциацией называется совместное нахождение минералов, обусловленное общностью происхождения. Объяснение этого явления и самый термин был введен в науку Брейтгауптом в 1849 г.; но даже древние рудокопы знали о явлениях совместного нахождения минералов, называя «спутниками» те из них, которые сопровождают добываемые минералы» (Уклонский, 1940, с. 71). В этом определении плохо то, что сначала «парагенезис» уравнивается с «природной ассоциацией». Но последняя есть просто «минеральная ассоциация, наблюдаемая в природе», в том числе смежность. Лишь потом уточняется, что она обусловлена общностью происхождения минералов. Весьма кривой путь к цели.

«При изучении генезиса и парагенезиса минералов необходимо обращать внимание также на последовательность образования минералов, выделяя различные «генерации» минералов или одного минерального вида, иначе говоря — минералы, образовавшиеся в определенные последовательно идущие моменты (этапы) процесса минералообразования. Среди месторождений Союза нетрудно указать множество примеров ярко выраженных парагенетических сообществ минералов» (Там же. С. 71–72). Здесь А. С. Уклонский следует В. М. Севергину и А. Брейтгаупту. Перечислим его «парагенетические сообщества» в сокращении (без химических формул).

«Магматический тип, хромитовые месторождения Ю. Урала: серпентин, оливин, хромит, хромпикотит, хромвезувиан, уваровит, кеммерерит, брусит. Контактный тип, Дашкесан, рудные минералы: магнетит, железный блеск, мартит, пирит, кобальтин, халькопирит; минералы скарна (контактное преобразование известняка): гранат, диопсид, дашкесанит, эпидот, кварц, кальцит. Пегматито-пневматолитовые месторождения, Алабашка: письменный гранит, дымчатый кварц, ортоклаз, альбит, берилл, топаз, турмалин, кордиерит, лепидолит. Пегматитовые мигматического типа Изумрудные копи: изумруд, берилл, александрит, фенакит, рутил, актинолит, хлорит, тальк. Пегматитовый тип щелочной магмы, Хибинь: апатит, нефелин, эгирин, эвдиалит-эвколит, астрофиллит, лампрофиллит, ринколит, натролит, пирротин. Гидротермальный тип, Садонское: галенит, сфалерит, пирротин, халькопирит, арсенопирит, кварц, кальцит; вторичные минералы в зоне окисления: смитсонит, церуссит, малахит, азурит» (Там же. С. 72).

Приведенные «парагенетические сообщества» не столько поясняют определение, сколько показывают возможное поле дискуссий о том, какие «определенные последовательно идущие моменты (этапы) процесса» продуцируют единый парагенезис, а какие следует разделить. Так, в «магматическом типе» оливин + хромит и серпентин + уваровит следует отнести к



разным парагенезисам (собственно магматическому и (авто)метаморфическому). В «контактном типе» в едином парагенезисе выделены две его разновидности по источнику вещества — рудные и Са-содержащие минералы. В «пегматито-пневматолитовом типе» можно разделить письменный гранит (эвтектическая кристаллизация, по А. Е. Ферсману) и все остальные минералы, кристаллизовавшиеся близкоодновременно в непрерывном процессе. В «пегматитовом типе щелочной магмы» не следует объединять в один парагенезис магматические апатит + нефелин, пегматитовые астрофиллит + лампрофиллит и гидротермальный натролит. В «гидротермальном типе» сульфиды металлов и минералы зоны окисления суть разные парагенезисы.

«Парагенезис, Брейтгаупт, 1849. — Законы ассоциации минералов в породах, жилах и т. д. Применяется и к ассоциациям (комплексам) горных пород. По Бетехтину (1949), под П. следует понимать только ассоциацию совместно образовавшихся минералов. См. смежность минералов» (Левинсон-Лессинг, Струве, 1963, с. 244). «Смежность минералов, Севергин, 1798, 1809 — совокупное пребывание двух или многих минералов. По Бетехтину (1949), этот термин Севергина по смыслу вполне соответствует распространившемуся позднее термину Брейтгаупта (1849) — „парагенезис“ в его первоначальной трактовке» (Там же. С. 329). Авторы, переработавшие, дополнившие и отредактировавшие этот словарь, своего мнения о смежности и парагенезисе не высказали, добавив мнение А. Г. Бетехтина. К сожалению, последний заузил смежность А. В. Севергина до парагенезиса А. Брейтгаупта, вероятно поддавшись ура-патриотизму И. Д. Седлецкого.

«Парагенезис — совместное нахождение, возникающее в результате одновременного или последовательного образования. Термин применяется к минералам (П. минералов), породам (П. пород), фациям (П. фаций). Первоначально имелось в виду только совместное нахождение минералов (смежность у Севергина). Более детально понятие „парагенезис“ впервые разработано Брейтгауптом» (Петров и др., 1981, с. 287). В этом объяснении плохо последнее предложение. А. Брейтгаупт определил понятие парагенезиса, а не разработал его более детально. Логическое соотношение парагенезиса и смежности таково: из всех совместных нахождений минералов, то есть смежностей В. М. Севергина, А. Брейтгаупт выделил те, которые образовались одновременно или близкоодновременно в непрерывном процессе, что доказывается их пространственными соотношениями. Это и есть парагенезисы.

Закключение

Еще раз вслушаемся: смежность — нахождение рядом, парагенезис (рожденный рядом, греч.) — общее происхождение, обусловившее пространственно-временную близость, с фиксации которой начинается попытка понимания. Между понятиями очевиден логический зазор (Иванов, 1972). Закрывать на это глаза — одиозное решение, вызванное погоней за приоритетами. В первом приближении смежность В. М. Севергина распадается: на смежность-1 (парагенезис А. Брейтгаупта) — ассоциацию минералов, образовавшихся в едином процессе из одного субстрата (расплава, рас-

твора) или по одному субстрату (при метасоматозе) одновременно (эвтектически, котектически, перитектически) или близкоодновременно; и смежность-2 — ассоциацию минералов, связанных причинно-следственно (каузально, первичные и вторичные минералы).

Исчерпано ли логическое содержание понятия смежности В. М. Севергина? Отнюдь нет. «Парагенезис минералов — совместное нахождение минералов, связанных генетически. Однако нередко под парагенезисом понимают просто совместное (пространственное) нахождение без каких-либо условий, что оспаривается. Для таких ассоциаций можно предложить термин «парастерезис» (Петров и др., 1981, с. 287). «Парастерезис А. П. Лебедев предлагает взамен термина «парагенезис», когда он употребляется в смысле пространственной ассоциации минералов или элементов. Например, при серицитизации плагиоклаза гранита или пегматита вместо парагенетической ассоциации плагиоклаз + кварц возникает ассоциация серицит + альбит + кварц. Серицит + альбит — ассоциация парагенетическая, а их ассоциация с кварцем — парастерическая» (Там же. С. 289).

Разве в этом примере совместное нахождение серицит + альбит и кварц — «без каких-либо условий»? Здесь два парагенезиса зацеплены друг за друга. Минералы одного замещают некоторые минералы другого и приводятся к сонахождению с незамещенными минералами. Аналогично в зоне окисления полиметаллических руд малахит и азурит замещают халькопирит и приводятся в сонахождение с галенитом и сфалеритом.

Примеры можно продолжить. Объяснение понятия в словаре неудачно. По-видимому, парастерезис — это «ортогенетическая ассоциация, то есть разновидность узких минеральных сообществ, компоненты которых образованы в разное время, в неодинаковых физико-химических условиях, а тесные связи между ними имеют донорно-акцепторный характер» (Петровская, 1978, с. 120).

Кажется, в минералогическом обиходе еще нет удобного термина для сонахождений минералов, никак не связанных генезисом, то есть для таких гетерогенетических ассоциаций (Там же. С. 122), которые не являются даже ортогенетическими. Возможно, именно в этом контексте еще появятся понятия для в разной степени коррелированных топоминеральных комплексов. Идея не нова (Вистелиус, 1948; Родионов, 1968; Воронин, Еганов, 1972). Появятся и понятия, все более дробящие пространство-время минералообразующего процесса, вплоть до выделения в отдельные парагенезисы структур распада и продуктов полиморфных превращений. Не потому, что в этом есть острая необходимость. Просто анализ — логическая процедура, к которой умы склонны более, чем к синтезу. Наконец, заметим, что понимание природного феномена может состояться в разных методологических руслах: феноменологическом (структурном, системном), пространственно-временном (что за чем), эволюционном (что из чего), каузальном (что по причине чего)... Все эти акценты уже присутствуют в дискуссии о смежности и парагенезисе.

Заслуги А. Брейтгаупта перед немецкой наукой прославлены мэрией и университетом Фрайберга в мемориальных досках и портретах с золочеными

рамами. Не менее признан в российской минералогии В. М. Севергин, родившийся в год смерти М. В. Ломоносова, продолживший его дело в науках о Земле, академик (1793), профессор Горного училища (1798–1801), один из основателей Российского минералогического общества (1817). Пристальное изучение его землеописаний северо-запада Российского государства в начале XIX века (Севергин, 1803, 1804) только начато (Шыдлоўскі, 2014). В связи с 300-летием Российской академии наук, 250-летием Горного университета и 200-летием Российского минералогического общества было бы правильно установить мемориальную доску на доме (Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой пр., д. 55), где он жил в 1798–1826 годах и размещались его уникальные коллекции минералов и библиотека, погибшие в катастрофах отечественной истории.

Литература / References

- Бетехтин А. Г. Понятие о парагенезисе минералов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1949. № 2. С. 7–18.
Betekhtin A. G. The concept of paragenesis of minerals. Proc. Acad. Sci. USSR. Ser. geol., 1949, 2, pp. 7–18. (in Russian)
- Бетехтин А. Г. Парагенетические соотношения и последовательность образования минералов // Зап. ВМО. 1951. № 2. С. 94–107.
Betekhtin A. G. Paragenetic relations and sequence of formation of minerals. Proc. Rus. Miner. Soc., 1951, 2, pp. 94–107. (in Russian)
- Бокий Г. Б., Шафрановский И. И. Русские кристаллографы // Тр. Ин-та истории естествознания АН СССР. 1947. Т. 1. С. 81–120.
Bokiy G. B., Shafranovsky I. I. Russian crystallographs. Proc. Inst. History of Natural Sci. Acad. Sci. USSR, 1947, 1, pp. 81–120. (in Russian)
- Васильев В. И., Драгунов В. И., Рундквист Д. В. «Парагенезис минералов» и «формация» в ряду образований различных уровней организации // Зап. ВМО. 1972. № 3. С. 87–94.
Vasiliev V. I., Dragunov V. I., Rundqvist D. V. «Paragenesis of minerals» and «formation» in a row of formations of various levels of organization. Proc. Rus. Miner. Soc., 1972, 3, pp. 87–94. (in Russian)
- Вистелиус А. Б. Мера связи между членами парагенезиса и методы ее изучения // Зап. ВМО. 1948. № 2. С. 147–158.
Vistelius A. B. The measure of the connection between the members of paragenesis and methods of its study. Proc. Rus. Miner. Soc., 1948, 2, pp. 147–158. (in Russian)
- Воронин Ю. А., Еганов Э. А. Фации и формации. Парагенезис. (Уточнение и развитие основных понятий геологии). Новосибирск: Наука, 1972. 96 с.
Voronin Yu. A., Eganov E. A. Facies and formations. Paragenesis. (Clarification and development of the basic concepts of geology). Novosibirsk: Nauka, 1972, 96 p. (in Russian)
- Григорьев Д. П. Онтогенез минералов. Львов: Изд. Львовского ун-та, 1961. 284 с.
Grigoriev D. P. Ontogeny of minerals. Lviv: Lviv University, 1961, 284 p. (in Russian)
- Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Индивидуумы. М.: Наука, 1975. 339 с.
Grigoriev D. P., Zhabin A. G. Ontogeny of minerals. Individuals. Moscow: Nauka, 1975, 339 p. (in Russian)
- Григорьев Д. П., Шафрановский И. И. Выдающиеся русские минералоги. М., Л.: Изд. АН СССР, 1949. 274 с.
Grigoriev D. P., Shafranovsky I. I. Outstanding Russian mineralogists. Moscow, Leningrad: USSR Acad. Sci., 1949, 274 p. (in Russian)
- Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979. 276 с.
Zhabin A. G. Ontogeny of minerals. Aggregates. Moscow: Nauka, 1979, 276 p. (in Russian)
- Жариков В. А. Парагенезис минералов, фации и формации // Зап. ВМО. 1968. № 4. С. 510–514.
Zharikov V. A. Paragenesis of minerals, facies and formations. Proc. Rus. Miner. Soc., 1968, 4, pp. 510–514. (in Russian)
- Иванов О. П. Некоторые замечания к определению понятий «парагенезис», «генерация минералов» и «стадия минерализации» // Зап. ВМО. 1972. № 5. С. 329–335.
Ivanov O. P. Some remarks on the definition of the concepts of «paragenesis», «generation of minerals» and «stage of mineralization». Proc. Rus. Miner. Soc., 1972, 5, pp. 329–335. (in Russian)
- Коржинский Д. С. Физико-химические основы анализа парагенезисов минералов. М.: Изд. АН СССР, 1957. 212 с.
Korzhin D. S. Physical-chemical bases of analysis of mineral paragenesis. Moscow: USSR Acad. Sci., 1957, 212 p. (in Russian)
- Левинсон-Лессинг Ф. Ю. Введение в историю петрографии. Л.: ОНТИ, 1936. 138 с.
Levinson-Lessing F. Yu. Introduction to the history of petrography. Leningrad: ONTI, 1936, 138 p. (in Russian)
- Левинсон-Лессинг Ф. Ю., Струве Э. А. Петрографический словарь. Л., М.: ОНТИ, 1932. 472 с.
Levinson-Lessing F. Yu., Struve E. A. Petrographic dictionary. Leningrad, Moscow: ONTI, 1932, 472 p. (in Russian)
- Левинсон-Лессинг Ф. Ю., Струве Э. А. Петрографический словарь. Л., М.: ОНТИ, 1937. 416 с.; 1937. 416 с.
Levinson-Lessing F. Yu., Struve E. A. Petrographic dictionary. Leningrad, Moscow: ONTI, 1937, 416 p. (in Russian)
- Петров В. П., Богатилов О. А. Петрографический словарь / Под ред. Р. П. Петрова. М.: Недра, 1981. 496 с.
Petrov V. P., Bogatnikov O. A., Petrov R. P. (eds.). Petrographic dictionary. Moscow: Nedra, 1981, 496 p. (in Russian)
- Петровская Н. В. О понятии «парагенетическая минеральная ассоциация» // Геология рудных месторождений. 1967. № 2. С. 27–38.
Petrovskaya N. V. On the concept of «paragenetic mineral association». Geology of ore deposits, 1967, 2, pp. 27–38. (in Russian)
- Петровская Н. В. Закономерные сообщества минералов, в частности парагенетические (понятия, термины) // Основные понятия минералогии. Киев: Наукова думка, 1978. С. 116–126.
Petrovskaya N. V. Natural communities of minerals, in particular paragenetic (concepts, terms). Basic concepts of mineralogy. Kiev: Naukova dumka, 1978, pp. 116–126. (in Russian)
- Родионов Д. А. Статистические методы разграничения геологических объектов по комплексу признаков. М.: Недра, 1968. 92 с.



- Rodionov D. A. Statistical methods of distinguishing geological objects by a set of features. Moscow, Nedra, 1968, 92 p. (in Russian)
- Севергин В. М. Первые основания минералогии или естественной истории ископаемых тел. СПб.: Имп. Акад. наук, 1798. Кн. 1. 498 с.; кн. 2. 437 с.
- Severgin V. M. The first foundations of mineralogy or the natural history of fossil bodies. St. Petersburg: Imp. Acad. Sci., 1798, book 1, 498 p.; book 2, 437 p. (in Russian)
- Севергин В. М. Записки путешествия по западным провинциям Российского государства или минералогические, хозяйственные и другие примечания, учиненные во время проезда через оные в 1802 году. СПб.: Имп. Акад. наук, 1803. 225 с.
- Severgin V. M. Travel notes on the western provinces of the Russian state, or mineralogical, economic and other notes made during the passage through them in 1802. St. Petersburg: Imp. Acad. Sci., 1803, 225 p. (in Russian)
- Севергин В. М. Продолжение записок путешествия по западным провинциям Российского государства или минералогические, технологические и другие примечания, учиненные во время проезда через оные в 1803 году. СПб.: Имп. Акад. наук, 1804. 168 с.
- Severgin V. M. Continuation of travel notes on the western provinces of the Russian state, or mineralogical, technological and other notes made during the passage through them in 1803. St. Petersburg: Imp. Acad. Sci., 1804, 168 p. (in Russian)
- Севергин В. М. Опыт минералогического землеописания Российского государства. СПб.: Имп. Акад. наук, 1809. Ч. 1. 262 с.; ч. 2. 240 с.
- Severgin V. M. The experience of mineralogical land survey of the Russian state. St. Petersburg: Imp. Acad. Sci., 1809, Pt. 1, 262 p.; Pt. 2, 240 p. (in Russian)
- Седлецкий И. Д. Академик В. М. Севергин и учение о парагенезисе минералов. К 150-летию «Первых оснований минералогии» // Вестник АН СССР. 1948. № 1. С. 37–38.
- Sedletsky I. D. Academician V. M. Severgin and the doctrine of mineral paragenesis. To the 150th anniversary of «The first foundations of mineralogy». Bull. Acad. Sci. USSR, 1948, 1, pp. 37–38. (in Russian)
- Уклонский А. С. Минералогия. М., Л.: Гостехиздат, 1940. 444 с.
- Uklonsky A. S. Mineralogy. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat, 1940, 444 p. (in Russian)
- Ушакова Н. Н., Фигуровский Н. А. Василий Михайлович Севергин. 1765–1826. М.: Наука, 1981. 161 с.
- Ushakova N. N., Figurovsky N. A. Vasily Mikhailovich Severgin. 1765–1826. Moscow: Nauka, 1981, 161 p. (in Russian)
- Шадлун Т. Н. О международном коллоквиуме по проблеме минеральных парагенезисов // Геология рудных месторождений. 1967. № 1. С. 70–74.
- Shadlun T. N. On the international colloquium on the problem of mineral paragenesis. Geology of ore deposits, 1967, 1, pp. 70–74. (in Russian)
- Шафрановский И. И. В. М. Севергин: создание русской кристаллографо-минералогической терминологии // История кристаллографии в России. М., Л.: Изд. АН СССР, 1962. С. 97–115.
- Shafranovsky I. I. V. M. Severgin: the creation of Russian crystallographic and mineralogical terminology. History of crystallography in Russia. Moscow, Leningrad: Acad. Sci. USSR, 1962, pp. 97–115. (in Russian)
- Юшкин Н. П. Пограничья минерального мира // Тезисы докл. к VIII съезду ВМО. СПб., 1992. С. 31–33.
- Yushkin N. P. Frontiers of mineral world. Report abstracts for the 8th Conference of RMS. St. Petersburg, 1992, pp. 31–33. (in Russian)
- Шыдлоўскі С. А. «Запіскі» В. М. Севергіна як крыніца па гісторыі і этнаграфіі Беларускага Падзвіння і сумежных тэрыторый // Беларускае Падзвінне: вопыт, методыка і вынікі палявых і міждысцыплінарных даследаванняў. Наваполацк: Полацкі дзяржаўны ўніверсітэт, 2014. С. 265–268.
- Shydlouskyy S. A. «Notes» by V. M. Severgin as a source on the history and ethnography of the Belarusian Podvinye and adjacent territories. Belarusian Podvinye: experience, methodology and results of field and interdisciplinary research. Novopolotsk: Polotsk State University, 2014, pp. 265–268. (in Belorussian)
- Breithaupt A. Die Paragenesis der Mineralien. Mineralogisch, geognostisch und chemisch beleuchtet, mit besonderer Rücksicht auf Bergbau. Freiberg, Verlag von J. G. Engelhardt, 1849, 276 S.
- Loewinson-Lessing F. Petrographisches Lexikon. Repertorium der petrographischen Termini und Benennungen. Jurjew, Druck von C. Mattiesen, 1893, 256 S.
- Prösler H. J., Wolf M. Der Paragenesebegriff — Diskussion um seine Definition in der Gegenwart // Freiburger Forschungshefte, 1969, S. 9–20.
- Šafranovskij I. I., Grigor'ev D. P. Vasilij Michajlovič Severgin (1765–1826) // Schriftenreihe für geologische Wissenschaften. (Ser. in geol. sciences). Berlin, Akad. Verlag, 1979, 14, S. 19–25.

Поступила в редакцию / Received 02.09.2024