



Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Март
March
2020,
№ 3 (303)

Главный редактор

А. М. Асхабов

Chief Editor

A. M. Askhabov

Редакционный совет

А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
И. Н. Бурцев, Сыктывкар, Россия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, Санкт-Петербург, Россия
А. Д. Гвишиани, Москва, Россия
И. В. Козырева, Сыктывкар, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
В. А. Коротеев, Екатеринбург, Россия
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия
М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия
Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия
Ж. К. Мелгарехо, Барселона, Испания
Ф. Мон, Пекин, Китай
П. Мянник, Таллин, Эстония
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США
О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия
М. А. Федонкин, Москва, Россия

Editorial Board

Anna I. Antoshkina, Syktyvkar, Russia
Maarten A.T.M. Broekmans, Trondheim, Norway
Igor N. Burtsev, Syktyvkar, Russia
Dmitry A. Bushnev, Syktyvkar, Russia
Yury L. Voytekhevsky, Saint Petersburg, Russia
Alexey D. Gvishiani, Moscow, Russia
Irina V. Kozyreva, Syktyvkar, Russia
Marko Komac, Ljubljana, Slovenia
Viktor A. Koroteev, Ekaterinburg, Russia
Sergey V. Krivovichev, Saint Petersburg, Russia
Sergey K. Kuznetsov, Syktyvkar, Russia
Maximiliano de Souza Martins, Ouro Preto, Brazil
Tatyana P. Mayorova, Syktyvkar, Russia
Joan Carles Melgarejo, Barcelona, Spain
Fancong Meng, Beijing, China
Peep Männik, Tallinn, Estonia
Alexander M. Pystin, Syktyvkar, Russia
Constance M. Soja, Hamilton, NY, USA
Oksana V. Udoratina, Syktyvkar, Russia
Mikhail A. Fedonkin, Moscow, Russia

Редакционная коллегия

А. И. Антошкина, *Т. М. Безносова* (ответственный секретарь), *И. Н. Бурцев*, *Д. А. Бушнев*,
И. В. Козырева, *О. Б. Котова* (заместитель главного редактора), *С. К. Кузнецов*, *Т. П. Майорова*,
А. М. Пыстин, *О. В. Удоратина*

Editorial team

A. I. Antoshkina, *T. M. Beznosova* (Executive Secretary),
I. N. Burtsev, *D. A. Bushnev*, *I. V. Kozyreva*,
O. B. Kotova (Deputy Chief Editor), *S. K. Kuznetsov*,
T. P. Mayorova, *A. M. Pystin*, *O. V. Udoratina*

Технический редактор

Г. Н. Каблис

Technical Editor

G. N. Kablis

Заведующий редакцией

Т. А. Некучаева

Managing Editor

T. A. Nekuchaeva

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2018) — 0,350



SCIENTIFIC JOURNAL

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

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Five-year RSCI
impact factor (2018) — 0.350

geo.komisc.ru/vestnik

Содержание

Content

Научные статьи

Scientific articles

Рудные минералы в метасоматитах харбейского метаморфического комплекса (Полярный Урал) <i>Н. С. Уляшева, А. С. Шуйский</i>	3
Фосфор в карбонатных породах <i>Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис, Н. В. Рыбина</i>	14
Борогипс: минеральный состав, технологии переработки <i>А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина, С. А. Патеюк, В. Г. Черкасов</i>	22
Экспедиция братьев Кузнецовых на Полярный Урал <i>Ю. Л. Войтеховский</i>	28
Янулов. К 100-летию воина и замечательного кристаллографа <i>В. И. Силаев, А. М. Асхабов, А. Ф. Хазов, П. П. Юхтанов</i>	33

Ore minerals in metasomatites of the Harbey metamorphic complex (Polar Urals) <i>N. S. Ulyasheva, A. S. Shuyskiy</i>	3
Phosphorus in carbonate rocks <i>Ya. E. Yudovich, M. P. Ketris, N. V. Rybina</i>	14
Borogypsum: mineral composition, processing technology <i>A. N. Khat'kova, L. G. Nikitina, S. A. Pateyuk, V. G. Cherkasov</i>	22
The Kuznetsov bros.' expedition to the Polar Urals <i>Yu. L. Voytekhovsky</i>	28
Yanulov. The 100th Anniversary of the warrior and wonderful crystallographer <i>V. I. Silaev, A. M. Askhabov, A. F. Khazov, P. P. Yukhtanov</i>	33

Хроника, события, факты

Chronicle, events, facts

Каменные цветы в Геологическом музее им. А. А. Чернова <i>И. Астахова</i>	44
--	----

Stone flowers in Chernov Geological museum <i>I. Astahova</i>	44
--	----

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting

geo.komisc.ru/vestnik/authors



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.08:553.22 (234.851)

DOI: 10.19110/geov.2020.3.1

РУДНЫЕ МИНЕРАЛЫ В МЕТАСОМАТИТАХ ХАРБЕЙСКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Н. С. Уляшева, А. С. Шуйский

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

Изучены рудные минералы в метасоматически измененных амфиболитах харбейского метаморфического комплекса по руч. Скалисту: дислоцированных клинозоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцах, преимущественно клинозоизитовых и окварцованных породах. Рудные минералы представлены сульфидами и редкими выделениями теллуридов, селенидов и самородных металлов. Выявлены несколько стадий последовательного формирования этих образований, связанных с гипогенными гидротермальными и гипергенными процессами. На раннем этапе гидротермально-метасоматических изменений пород в них сформировались высоко- и среднетемпературные рудные минералы — пирит, пентландит, Ni-пирротин и, возможно, халькопирит и молибденит, ассоциирующиеся с хлоритом-рипидолитом. Следующая стадия связана с гидротермальными процессами, в результате которых в измененных амфиболитах кристаллизовались высоко- и среднетемпературные образования золотосульфидно-кварцевой формации: пирит, халькопирит, молибденит, матильдит-галенит, галенит, сфалерит, борнит, пирротин, относительно низкопробное золото и Hg-электрум. В породах отмечаются средне- и низкотемпературные гидротермальные минералы третьей стадии, ассоциирующие с пикнохлорит-брунгсвитом и рипидолит-дафнитом: Ni- и Co- пирит, клаусталит-галенит, мелонит, меренскиит, меренскиит-мелонит, акантит и гессит. Гипергенные изменения пород привели к формированию в метасоматитах самородного серебра, ковеллина, акантита, гессита и т. д.

Ключевые слова: харбейский комплекс, рудные минералы, метасоматиты, золото.

ORE MINERALS IN METASOMATITES OF THE HARBEY METAMORPHIC COMPLEX (POLAR URALS)

N. S. Ulyasheva, A. S. Schuyskij

Institute of Geology FRC of Komi SC UB RAS, Syktyvkar

Ore minerals were studied in metasomatically altered amphibolites of the Harbey metamorphic complex along Skalisty stream: dislocated clinozoisite-chlorite-muscovite-albite-amphibole schists, mainly clinozoisite and quartz rocks. Ore minerals are represented by sulfides and rare deposits of tellurides, selenides and native metals. Several stages of the sequential formation of these formations associated with hypogenic hydrothermal and hypergenic processes were identified. At an early stage of hydrothermal-metasomatic changes of rocks, high- and medium- temperature ore minerals were formed in them-pyrite, pentlandite, Ni-pyrrhotite and possibly chalcopryite and molybdenum, associated with chlorite — ripidolite. The next stage is associated with hydrothermal processes, as a result of which high- and medium-temperature formations of the gold-sulfide-quartz formation were crystallized in the altered amphibolites: pyrite, chalcopryite, molybdenite, matyltite-galena, galena, sphalerite, bornite, pyrrhotite, relatively low-grade gold and Hg-electrum. The rocks contain medium- and low-temperature hypogenic minerals of the third stage, associated with pycnochlorite-brungsvigite and ripidolite-daphnite: Ni- and Co pyrite, clausalite-galena, melonite, merenskiite, merenskiite-melonite, hessite and acanthite. At the final stages, under the influence of low-temperature hypergenic processes, native silver, covellite, acanthite, hessite, etc. formed in metasomatites.

Keywords: Harbey complex, ore minerals, metasomatites, gold.

Харбейский метаморфический комплекс (рис. 1) расположен в восточной части западной тектонической зоны Полярного Урала в пределах одноименного блока и сложен различными гнейсами и амфиболитами раннепротерозойского возраста [1, 2, 8, 11]. В зонах разломов и надвигов, насыщенных разнообразным и разновозрастным (протерозойским, палеозойским и мезозойским) магматизмом, по этим породам развива-

ются метасоматиты — пропилиты, березиты, альбититы, к которым приурочены пункты золотосульфидной и золотомедной минерализаций редкоземельно-редкометаллической и золотосульфидно-кварцевой формаций. В результате работ по геологическому доизучению листов Q-42-VII, VIII на территории харбейского комплекса были околочены несколько прогнозируемых участков на золото [2, 3].

Для цитирования: Уляшева Н. С., Шуйский А. С. Рудные минералы в метасоматитах харбейского метаморфического комплекса (Полярный Урал) // Вестник геонаук. 2020. 3(303). С. 3—13. DOI: 10.19110/geov.2020.3.1.

For citation: Ulyasheva N. S., Schuyskij A. S. Ore minerals in metasomatites of the Harbey metamorphic complex (Polar Urals). Vestnik of Geosciences, 2020, 3(303), pp. 3—13. DOI: 10.19110/geov.2020.3.1.

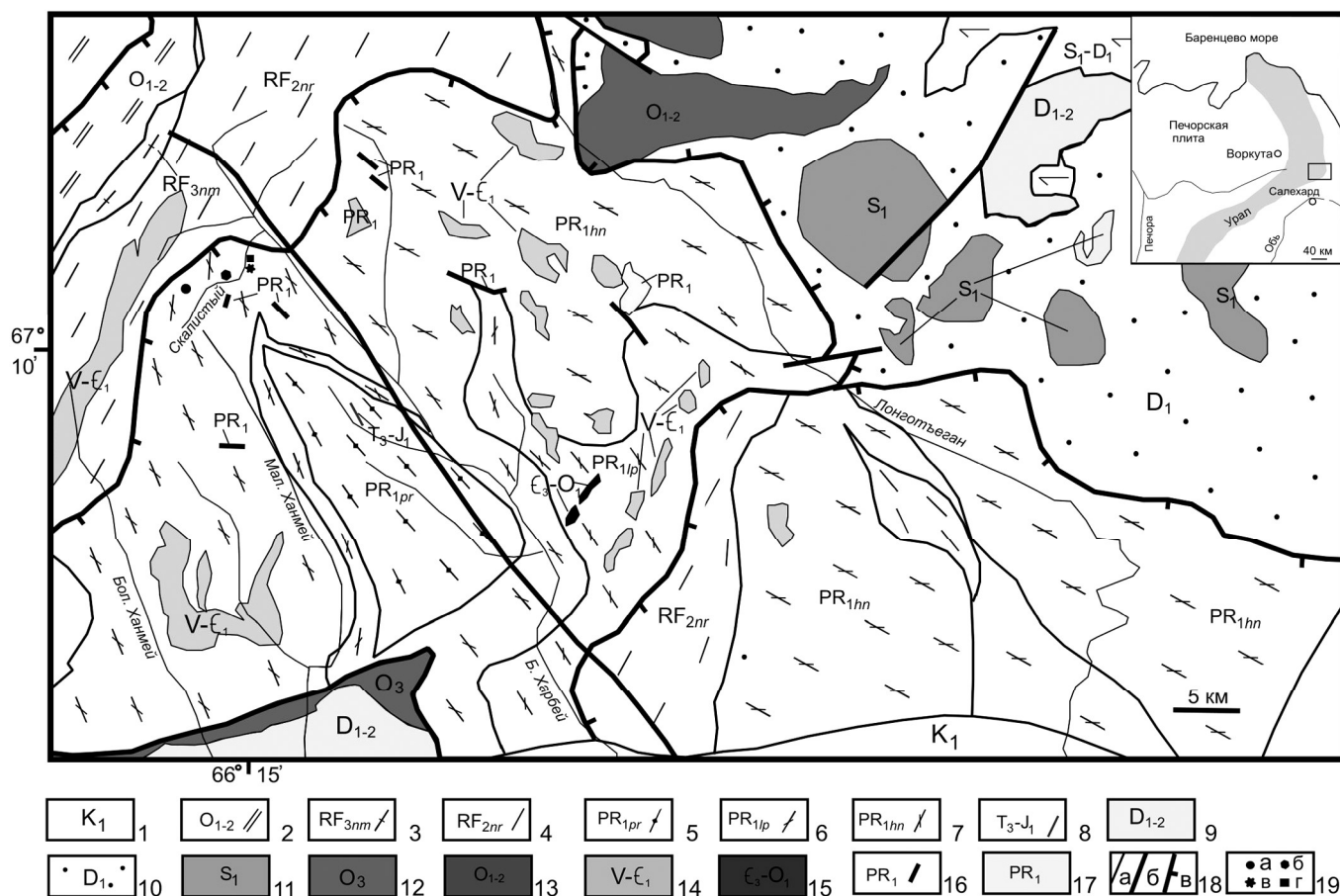


Рис. 1. Схематическая карта харбейского метаморфического комплекса (по [2]): 1 — харосоимская свита (глины, песчаники, аргиллиты); 2 — орангская свита (филлитовидные сланцы, песчаники, известняки); 3 — немурьюганская свита (парасланцы, мраморы, кварциты, метаэффузивы); 4 — няровейская серия (сланцы и метабазальты верхнехарбейской и минисейшорской свит); 5–7 — харбейский метаморфический комплекс (5 — париквасышорская свита (кристаллические сланцы, амфиболиты); 6 — лаптаюганская свита (гнейсы, мраморы, амфиболиты); 7 — ханмейхойская свита (амфиболиты, гнейсы)); 8 — яляяхинский комплекс гипабиссальный (долериты, лампрофиры); 9 — собский комплекс plutонический (диориты, гранодиориты, тоналиты); 10 — юньягинский комплекс plutонический (габбро, габбро-диориты); 11 — харампейско-масловский комплекс plutонический (габбро-нориты); 12 — кэршорский комплекс plutонический (дуниты, серпентиниты, габбро); 13 — сыумкеуский дунит-гарцбургитовый plutонический комплекс (лерцолиты, гарцбургиты, дуниты); 14 — сядатояхинский комплекс гранитовый plutонический; 15 — хартманюшорский комплекс измененных ультрамафитов; 16 — васькеуский комплекс plutонический (метагаббро, метагаббро-долериты); 17 — евьюганский комплекс plutонический (мigmatит-плагииграниты, гранито-гнейсы); 18 — разрывные нарушения: а — разлом второстепенный; б — разлом главный, с — надвиг главный; 19 — места отбора образцов (а — клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовый сланец, б — мусковит-хлорит-клиноцоизитовая порода, в — окварцованный измененный амфиболит, г — хлорит-кварц-клиноцоизитовая порода)

Fig. 1. Schematic map of the Harbey metamorphic complex (according to [3]). Legend: 1 — Kharosoim formation (clay, sandstone, mudstones); 2 — Orang formation (phyllite schists, sandstones, limestones); 3 — non-Muryugan formation (paraslists, marbles, quartzites, meta-effusives); 4 — Nyarveyskaya series (shales and metabasalts of the Upperharbey and Minisheysor formation); 5–7 — the Harbey metamorphic complex (5 — the Parikvasshor formation (crystalline schists, amphibolites); 6 — the Laptayugan formation (gneisses, marbles, amphibolites); 7 — the Hanmeikhoy formation (amphibolites, gneisses)); 8 — the Yalyayakhinsky hypabyssal complex (dolerites, lamprophyres); 9 — Sobsky plutonic complex (diorites, granodiorites, tonalites); 10 — Yunyaginsky plutonic complex (gabbro, gabbrodiorite); 11 — Kharampeysko-Maslovsky complex plutonic (gabbro-norites); 12 — Kershorsky plutonic complex (dunites, serpentinites, gabbros); 13 — Syumkeu dunite-harzburgite plutonic complex (lerzolites, harzburgites, dunites); 14 — Syadatoyakhinsky plutonic granite complex; 15 — Hartmanyushor complex of altered ultramafites; 16 — Vaskeu plutonic complex (metagabbro, metagabbrodolerites); 17 — Evyugan kompleks plutonic (migmatite-plagiogranites, granitogneisses); 18 — discontinuous violations: a — minor fault; b — the main fault; c — the main overthrust; 19 — locations of sampling (a — clinozoisite-chlorite-muscovite-albite-amphibole schist, b — muscovite-chlorite-clinozoisite, c — quartzly altered amphibolite, d — chlorite-quartz-clinozoisite)

Нами изучены в различной степени измененные амфиболиты в западной части харбейского метаморфического комплекса по руч. Скалистоу в непосредственной близости от контакта с верхнепротерозойскими образованиями и вне прогнозируемых участков. Рассматриваемые породы сильно деформированы, смяты в складки и пересекаются кварцевыми, кальцитовыми, хлорит-кальцитовыми прожилками и кварцевыми жилами. В них наблюдается

вкрапленная и прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация. Составы некоторых рудных минералов из амфиболитов были установлены в предыдущей работе [12].

Целью данной работы является установление состава, условий формирования и последовательности образования рудных минералов в различных типах измененных амфиболитов харбейского метаморфического комплекса по руч. Скалистоу.



Методы исследования

Взаимоотношения пороодообразующих минералов и последовательность формирования минеральных парагенезисов наблюдались под поляризационным микроскопом в шлифах. Аншлифы, изготовленные из сульфидизированных образцов пород, а также отдельные зерна пирита (около 200 шт) изучались на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max (аналитики А. С. Шуйский, Е. М. Тропников). Составы некоторых рудных минералов диагностированы методом рамановской спектроскопии (аналитик С. И. Исаенко). Вышеперечисленные исследования проводились в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

Петрохимические особенности пород

В пределах харьбейского метаморфического комплекса по руч. Скалистому на протяжении первых километров от контакта с няровейской серией породы представлены в различной степени дислоцированными и измененными амфиболитами. Слабоизмененные амфиболиты имеют сланцеватую порфиروبластовую структуру, гранонематобластовую структуру и состоят из амфибола — барруазита (50–70 %), альбита (до 20 %), клиноцоизита (до 10 %), хлорита (до 5 %), граната (1–3 %), мусковита (до 3 %) и кварца (до 1 %). Акцессорные минералы представлены цирконом, титанитом и апатитом, рудные — магнетитом и пиритом. Альбит образует порфиробласты с гелицитовой структурой, хлорит и мусковит формируют крупные чешуйки до 2 мм и обнаруживают позднюю минерализацию по отношению к барруазиту и гранату.

Измененные амфиболиты представлены дислоцированными сланцами, окварцованными породами и эпидозитами. Они пересекаются кальцитовыми, кальцит-кальципатовыми, хлорит-кальцитовыми, кварцевыми прожилками и кварцевыми жилами.

Сланцы имеют полосчатую текстуру и гранолепидонематобластовую структуру. Основными минералами в них выступают хлорит, мусковит, альбит, актинолит, магнезиальная роговая обманка, кварц, клиноцоизит, барруазит, гранат, кальцит и калиевый полевой шпат, содержащиеся в разных пропорциях. Акцессорные минералы представлены титанитом, цирконом, баритом и монацитом. Полосчатость пород обусловлена распределением минералов в отдельные прослои. Наиболее ранними минералами являются барруазит и гранат, унаследованные от амфиболитов.

Процессы окварцевания наблюдаются в амфиболитах и сланцах. Кварц образует прожилки и линзообразные выделения, часто приуроченные к осветленным прослоям сланцев, где основными минералами являются ранний кварц, альбит, клиноцоизит и хлорит.

Преимущественно эпидотовые породы встречаются в виде будин и обособлений среди амфиболитов и сланцев и имеют массивную текстуру. По минеральному составу можно выделить мусковит-хлорит-клиноцоизитовые и хлорит-кварц-клиноцоизитовые разновидности. Они пересекаются мусковитовыми, кварцевыми, хлоритовыми, кварц-кальцит-хлоритовыми, кальцитовыми и кварц-кальцитовыми прожилками.

Изучение химического состава вышеперечислен-

ных пород показало [12], что в сланцах с повышенным содержанием мусковита увеличиваются содержания глинозема и калия по сравнению с амфиболитами, а в сланцах с высоким содержанием альбита увеличивается количество натрия. Окварцевание пород сопровождается повышением кремнезема и марганца и понижением окисного железа и натрия. Преимущественно клиноцоизитовые породы характеризуются повышенным количеством кальция, двуокиси углерода и пониженными содержаниями закисного железа, марганца, магния, натрия относительно амфиболита. Таким образом, сланцы, окварцованные породы и эпидозиты представляют собой метасоматически преобразованные амфиболиты. Судя по взаимоотношениям пород и минералов, процессы мусковитизации, альбитизации и хлоритизации (рипидолит) предшествовали окварцеванию.

В метасоматитах часто наблюдается вкрапленная и прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация. Основная часть сульфидов отлагалась совместно с кварцем, о чем свидетельствует сильная положительная корреляция кремнезема с сульфидной серой. Сера образует также положительную корреляцию с закисным железом, магнием и натрием, и поэтому вполне вероятно, что сульфиды отлагались также при хлоритизации и альбитизации пород.

Рудная минерализация

Изучены рудные минералы из метасоматитов по амфиболитам: клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцев, окварцованных и эпидотизированных пород. Преобладающая часть рудных минералов представлена сульфидами. Состав некоторых сульфидов, а также минералов золота и серебра выявлен в результате пересчета полученных данных на нормативно-минеральный состав, так как из-за их мелких размеров на результаты анализов влияет состав окружающей матрицы.

В клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцах сульфиды образуют вкрапленную минерализацию (2–3 %) и представлены в основном пиритом (90 %) и халькопиритом (10 %). В подчиненном количестве присутствует никельсодержащий пирротин (Ni до 0.63 %). Пирит встречается в виде двух разновидностей. Первая разновидность пирита имеет крупные кристаллы кубической формы размером до 0.5 мм (рис. 2, а; табл. 1, № 1 и 2), а вторая разновидность — мелкие бесформенные зерна размером до 80 мкм с примесью никеля, иногда кадмия (рис. 2, б; табл. 1, № 3 и 4).

В кубическом пирите наблюдаются включения титанита, эпидота, пентландита (табл. 2; № 1 и 2), никельсодержащего пирротина (табл. 3; № 1–3), халькопирита (табл. 4; № 1 и 2) и молибденита (табл. 5; № 1 и 2). Кобальтсодержащий пентландит и никельсодержащий пирротин образуют срастания размером до 70 мкм (рис. 2, с), возможно являясь продуктами распада твердого раствора.

В никельсодержащем пирите отмечаются выделения халькопирита с нечеткими границами, клаусталита-галенита (рис. 2, d; табл. 6, № 1 и 2), мелонита (NiTe_2 , табл. 7) и гессита (Ag_2Te , рис. 2, e). К полостям и трещинкам приурочены акантит (Ag_2S), самородное серебро, иногда с примесью золота, и гессит (рис. 2, f). Никельсодержащий пирит образует срастания с пикнохлорит-брунгсвитом

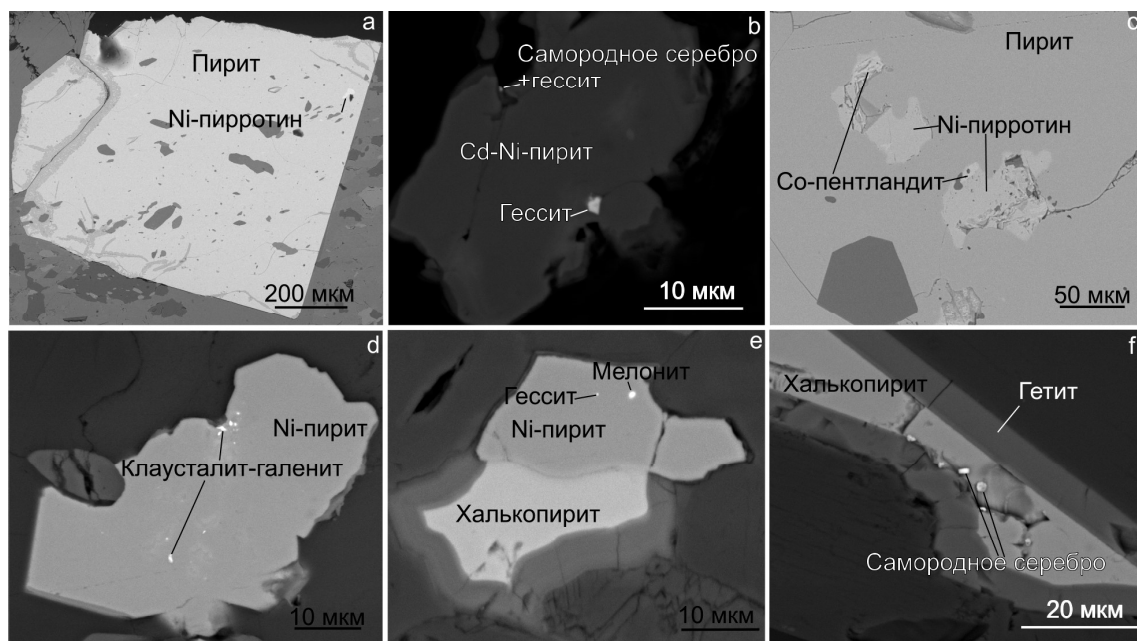


Рис. 2. Рудные минералы в клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцах (а–f — пояснение в тексте)

Fig. 2. Ore minerals in clinozoisite-chlorite-muscovite-albite-amphibole schists (a–f — explanation in the text)

и ассоциируется, скорее всего, с кальцитом. Клаусталит-галенит, мелонит, гессит, акантит и самородное серебро имеют размеры не более 3 мкм.

Халькопирит встречается в виде мелких включений (до 100 мкм) в кубических пиритах в ассоциации с молибденитом. Этот минерал наблюдается в основной массе породы в виде неправильных угловатых зерен размером до 150 мкм, иногда в сростании с никелистым пиритом, а также в виде выделений в нем (рис. 2, е).

В окварцованных сланцах наблюдается вкрапленная и прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация (до 8–10 %). Сульфиды представлены в основном зернами пирита кубической формы размером до 1 см (табл. 1; № 5, 6) и редкими выделениями халькопирита, молибденита и хромферрита ($\text{Fe}_{1.5}\text{Cr}_{0.2}$). В виде включений в пирите находятся гранат, хлорит, альбит, пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит, молибденит, барит, золото, акантит, акантит-гессит, гессит, науманнит-акантит-гессит, самородное серебро, петцит (? Ag_3AuTe_2), ютенбогардтит (? Ag_3AuS_2), а также твердые растворы, имеющие промежуточный состав между халькопиритом и пирротином, халькопиритом и сфалеритом.

Таблица 1. Химический состав пирита, мас. %

Table 1. The chemical composition of pyrite, wt. %

№ п/п	S	Fe	Ni	Co	Сумма Sum	Формула Formula
1	54.14	45.93	—	—	100.07	$\text{Fe}_{0.97}\text{S}_2$
2	53.79	45.56	—	—	99.35	$\text{Fe}_{0.97}\text{S}_2$
3	53.58	44.61	1.18	—	99.38	$(\text{Fe}_{0.97}\text{Ni}_{0.02})_{0.97}\text{S}_2$
4	52.68	43.71	1.29	—	98.97	$(\text{Fe}_{0.95}\text{Ni}_{0.03})_{0.98}\text{S}_2$
5	53.08	45.84	—	—	98.92	$\text{Fe}_{0.99}\text{S}_2$
6	51.88	45.26	—	—	97.13	$\text{Fe}_{0.99}\text{S}_2$
7	53.74	46.01	—	—	99.75	$\text{Fe}_{0.98}\text{S}_2$
8	53.33	38.21	—	8.48	100.02	$(\text{Fe}_{0.82}\text{Co}_{0.17})_{0.99}\text{S}_2$
9	53.47	40.89	—	5.59	99.95	$(\text{Fe}_{0.87}\text{Co}_{0.11})_{0.98}\text{S}_2$
10	54.20	44.20	0.37	1.83	100.60	$(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.04}\text{Ni}_{0.01})_{0.98}\text{S}_2$

Примечание. 1–4 — из клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцев, 5, 6 — из окварцованных пород, 7 — из мусковит-хлорит-клиноцоизитовых пород, 8–10 — из хлорит-кварц-клиноцоизитовых пород.

Note. 1–4 — from clinozoisite-chlorite-muscovite-albite-amphibole schists, 5, 6 — from quartz rocks, 7 — their muscovite-chlorite-clinozoisite rocks, 8–10 — from chlorite-quartz-clinozoisite rocks.

Таблица 2. Химический состав пентландита и борнита, мас. %

Table 2. The chemical composition of pentlandite and bornite, wt. %

№ п/п	Fe	Cu	S	Ni	Co	Сумма Sum	Формула Formula
1	27.55	—	33.72	30.34	8.1	99.71	$(\text{Fe}_{3.74}\text{Ni}_{3.9}\text{Co}_{1.04})_{8.68}\text{S}_8$
2	30.35	—	34.06	35.27	—	99.68	$(\text{Fe}_{4.07}\text{Ni}_{4.49})_{8.56}\text{S}_8$
3	12.80	56.76	25.68	—	—	95.24	$\text{Cu}_{4.42}\text{Fe}_{1.14}\text{S}_4$
4	14.96	57.11	28.60	—	—	100.67	$\text{Cu}_{3.9}\text{Fe}_{1.19}\text{S}_4$
5	13.57	58.81	27.87	—	—	100.25	$\text{Cu}_{4.22}\text{Fe}_{1.11}\text{S}_4$
6	13.20	60.00	26.61	—	—	99.81	$\text{Cu}_{4.50}\text{Fe}_{1.13}\text{S}_4$

Примечание. 1–2 — пентландит из клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцев; 3–6 — борнит из окварцованных (3, 4) и мусковит-хлорит-клиноцоизитовых пород (5, 6).

Note. 1–2 — pentlandite from clinozoisite-chlorite-muscovite-albite-amphibole schists; 3–6 — bornite from quartz (3, 4) and muscovite-chlorite — clinozoisite rocks (5, 6).



Таблица 3. Химический состав пирротина, мас. %

Table 3. The chemical composition of pyrrhotite, wt. %

№ п/п	S	Fe	Ni	Сумма Sum	Формула Formula
1	39.40	60.87	0.52	100.79	$(\text{Fe}_{0.88}\text{Ni}_{0.01})_{0.89}\text{S}$
2	39.01	59.67	0.55	99.23	$(\text{Fe}_{0.89}\text{Ni}_{0.01})_{0.90}\text{S}$
3	39.56	60.08	0.54	100.18	$(\text{Fe}_{0.87}\text{Ni}_{0.01})_{0.88}\text{S}$
4	39.15	60.12	—	99.27	$\text{Fe}_{0.88}\text{S}$
5	39.40	60.87	—	100.27	$\text{Fe}_{0.88}\text{S}$
6	37.94	58.26	—	96.20	$\text{Fe}_{0.88}\text{S}$

Примечание. 1–3 — из клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцев, 4–6 — из окварцованных пород.

Note. 1–3 are from clinozoisite-chlorite-muscovite-albite-amphibole schists, 4–6 are from quartzite rocks.

Таблица 4. Химический состав халькопирита, мас. %

Table 4. The chemical composition of chalcopyrite, wt. %

№ п/п	Fee	Cu	S	Сумма Sum	Формула Formula
1	23.51	37.76	37.32	98.59	$\text{Cu}_{1.01}\text{Fe}_{0.72}\text{S}_2$
2	30.39	33.34	35.42	99.15	$\text{Cu}_{0.94}\text{Fe}_{1.04}\text{S}_2$
3	30.77	32.91	35.33	99.01	$\text{Cu}_{0.93}\text{FeS}_2$
4	30.84	33.28	35.30	99.43	$\text{Cu}_{0.94}\text{FeS}_2$

Примечание. 1, 2 — из клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцев, 3, 4 — из окварцованных пород.

Note. 1, 2 — from clinozoisite-chlorite-muscovite-albite-amphibole schists, 3, 4 — from quartzite rocks.

Хромферрид ($\text{Fe}_{1.5}\text{Cr}_{0.2}$) образует пластинчатые образования размером до 200 мкм и сростания с хлоритом (рис. 3, а; табл. 8). Минерал имеет примеси кремния, марганца, никеля и молибдена. В виде изометричных включений размером до 20 мкм в нем наблюдаются соединения Fe-Cr (?), в которых по сравнению с хромферридом повышаются содержания хрома и молибдена, а также появляется стронций. На границе хромферрида и Fe-Cr-соединений имеются изометричные образования размером до 2 мкм оксида молибдена. Несмотря на единичную находку этого минерала, мы не стали исключать его из рассмотрения, так как хромферрид часто встречается в золоторудных проявлениях в амфиболитах и ассоциируется с золотоносными кварцевыми прожилками [5].

Сфалерит представлен несколькими разновидностями. Марганецсодержащий сфалерит наблюдается в виде изометричных выделений размером до 2 мкм в

пирротине (рис. 3, б; табл. 9, № 1). Кадмийсодержащие разновидности этого минерала — пришибрамиты — размером до 20 мкм образуют сростания с халькопиритом, возможно являясь продуктами распада твердого раствора (рис. 3, с; табл. 9, № 2–5). Самостоятельные зерна в пирите, ассоциирующиеся с золотом, образуют сфалериты изометричной и удлиненной формы размером до 20 мкм без примесей кадмия и марганца (рис. 3, d; табл. 9, № 6–9). Содержание железа в минерале варьирует от 2.6 до 9.48 мас. %.

Галенит наблюдается в виде неправильных выделений в пирите размером до 3 мкм и представлен двумя разновидностями. Первая, скорее всего, образует твердый раствор с матильдитом (AgBiS_2) и сростания с самородным висмутом (рис. 3 е; табл. 6, № 3, 4), а вторая — отдельные выделения галенита без примесей, иногда селенсодержащего (рис. 3 f; табл. 6, № 5–7).

Борнит образует изометричные и удлиненные амбообразные включения в пирите размером до 30 мкм (рис. 3 g; табл. 2, № 3, 4). Ранее он нами ошибочно был определен как железистый спинокопит [12]. Изучение этого минерала методом рамановской спектроскопии показало, что в его спектре присутствуют линии ($281, 339 \text{ см}^{-1}$), характерные для борнита, а также полосы (469 см^{-1}), соответствующие ковеллину (рис. 4).

Пирротин представлен в виде изометричных выделений в пирите до 30 мкм (рис. 3 d; табл. 3, № 4–6). Также он образует твердые растворы с халькопиритом в разных пропорциях.

Халькопирит встречается в виде твердых растворов с пирротинном и сфалеритом, сростаний со сфалеритом и отдельных выделений размером до 150 мкм (табл. 4; № 3, 4).

Молибденит образует чешуйки до 40 мкм в пирите и в межзерновом пространстве (табл. 5, № 3–6).

Золото с пробностью 680–740 наблюдается в виде изометричных выделений размером до 6 мкм и является относительно низкопробным [7] (рис. 3, h; табл. 10).

Акантит, гессит, акантит-гессит, акантит-науманит-гессит и самородное серебро с примесью золота образуют изометричные зерна размером до 1 мкм и локализируются в трещинах и зонах контактов двух минералов: пирита и борнита, пирита и халькопирита, пирротина и пирита (рис. 3, i–k).

Петцит (?) в ассоциации с акантитом (?), ютенбогартитом (?) и гесситом (?) образуют зернистые агрегаты размером меньше 5 мкм также в зоне контактов сульфидов (рис. 3, l).

Таблица 5. Химический состав молибденита и ассоциирующих с ним сульфидов, мас. %

Table 5. The chemical composition of molybdenite and its associated sulfides, wt. %

	Fe	S	Ni	Mo	Сумма Sum	Расчет нормативно-минерального состава Calculation of normative-mineral compositions
1	57.85	37.67	0.67	2.93	99.12	$0.91(\text{Fe}_{0.94}\text{Ni}_{0.01})_{0.95}\text{S}+0.09\text{MoS}_2$
2	8.84	43.4	—	47.44	99.68	$0.76\text{Mo}_{0.95}\text{S}_2+0.24\text{FeS}_2$
3	22.48	45.15	—	26.27	94.33	$0.58\text{FeS}_2+0.42\text{Mo}_{0.95}\text{S}_2$
4	12.95	42.03	—	38.45	95.67	$0.64\text{Mo}_{0.95}\text{S}_2+0.36\text{FeS}_2$
5	—	40.18	—	58.78	98.96	$\text{Mo}_{0.98}\text{S}_2$
6	9.75	43.52	—	46.79	100.06	$0.72 \text{ MoS}_2+0.28\text{Fe}_{0.9}\text{S}_2$

Примечание. 1, 2 — из клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых пород, 3–6 — из окварцованных пород.

Note. 1, 2 — from clinozoisite-chlorite-muscovite-albite-amphibole rocks, 3–6 — from quartzite rocks.



Таблица 6. Химический состав галенита и ассоциирующих с ним минералов, мас. %

Table 6. The chemical composition of galena and associated minerals, wt. %

	S	Fe	Cu	Se	Ag	Te	Pb	Bi	Co	Сумма Sum	Расчет нормативно-минерального состава Calculation of normative-mineral compositions
1	25.43	15.2	4.68	3.79	—	—	43.87	—	—	92.97	0.42FeS ₂ +0.37Pb(S _{0.84} Se _{0.16})+0.21Cu FeS ₂
2	18.13	10.41	0.43	5.65	—	—	62.88	—	—	97.5	0.53Pb(S _{0.76} Se _{0.24})+0.44Fe _{1.16} S ₂ +0.03Cu FeS ₂
3	35.07	25.62	—	—	1.54	0.67	34.35	2.17	—	99.42	0.78FeS ₂ +0.21(Pb _{0.92} Bi _{0.06} Ag _{0.02})S+0.01Ag ₂ Te
4	12.37	7.11	—	—	2.28	0.54	48.95	29.55	—	100.8	0.55(Pb _{0.96} Ag _{0.05} Bi _{0.05}) _{1.06} S+0.29Fe _{0.9} S+0.14Bi+0.01Ag ₂ Te
5	15.2	6.14	—	—	—	—	78.24	—	—	99.58	0.76Pb _{1.07} S+0.24Fe _{0.9} S
6	35.21	27.63	—	—	—	—	25.57	—	—	88.42	0.86FeS ₂ +0.14Pb _{1.08} S
7	18.42	6.03	—	1.04	—	—	75.36	—	—	100.85	0.70Pb _{0.97} (S _{0.96} Se _{0.04})+0.30FeS ₂
8	30.04	19.52	—	1.53	—	—	46.79	—	1.57	99.45	0.72(Fe _{0.93} Co _{0.07})S ₂ +0.28Pb _{1.09} (S _{0.91} Se _{0.09})

Примечание. 1–2 — из клинозоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых пород (1 — пирит + клаусталит-галенит + халькопирит, 2 — клаусталит-галенит + пирит + халькопирит); 3–7 — из окварцованных пород (3 — пирит + матильтид-галенит + гессит, 4 — матильтид-галенит + пирротин + самородный висмут + гессит, 5 — галенит + пирротин, 6 — пирит + галенит, 7 — клаусталит-галенит + пирит), 8 — из хлорит-кварц-клинозоизитовых пород (кобальтсодержащий пирит + клаусталит-галенит).

Note. 1–2 — from clinozoesite-chlorite-muscovite-albite-amphibole rocks (1 — pyrite + clautolite-galena + chalcopryrite, 2 — clautolite-galena + pyrite + chalcopryrite); 3–7 — of quartz rocks (3 — pyrite + matyltide-galenite + hessite, 4 — matilthide-galenite + pyrrhotite + native bismuth + hessite, 5 — galenite + pyrrhotite, 6 — pyrite + galenite, 7 — clautolite-galenite + pyrite), 8 — from chlorite-quartz-clinozoesite rocks (cobalt-containing pyrite + clautalite-galena).

Таблица 7. Химический состав мелонита, меренскиита и их ассоциаций, мас. %

Table 7. The chemical composition of melonite, merenskyite and their associations, wt. %

	S	Fe	Te	Ni	Pd	Сумма Sum	Расчет нормативно-минерального состава Calculation of normative-mineral compositions
1	34.09	25.74	33.91	8.86	—	102.6	0.79Fe _{0.86} S ₂ +0.21Ni _{1.13} Te ₂
2	25.95	21.14	35.19	1.60	12.88	96.76	0.75(Fe _{0.93} Ni _{0.07})S ₂ +0.25Pd _{0.88} Te ₂
3	31.64	23.90	30.09	4.76	5.55	95.94	0.80(Fe _{0.86} Ni _{0.03}) _{0.89} S ₂ +0.20(Ni _{0.55} Pd _{0.45})Te ₂

Примечание. 1 — из клинозоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых пород (пирит + мелонит), 2, 3 — из хлорит-кварц-клинозоизитовых пород (2 — пирит + меренскиит, 3 — пирит + меренскиит-мелонит).

Note. 1 — from clinozoesite-chlorite-muscovite-albite-amphibole rocks (pyrite + melonite), 2, 3 — from chlorite-quartz-clinozoesite rocks (2 — pyrite + merenskyite, 3 — pyrite + merenskyite-melonite).

Таблица 8. Химический состав хромферрида и его ассоциаций, мас. %

Table 8. The chemical composition of chromferride and its associations, wt. %

	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Sr	Mo	Сумма Sum	Формула Formula
1	—	0.69	10.22	0.98	85.11	0.82	—	0.82	98.64	Fe _{1.55} Cr _{0.2} Si _{0.03} Mn _{0.02} Ni _{0.01} Mo _{0.01}
2	—	0.14	44.5	—	42.96	—	0.38	1.88	89.86	Cr _{1.12} FeMo _{0.03} Si _{0.01} Sr _{0.01}
3	—	0.19	41.44	0.99	43.6	—	0.56	3.84	90.62	Cr _{1.12} FeMo _{0.03} Mn _{0.02} Si _{0.01} Sr _{0.01}
4	16.44	1.65	13.47	—	9.23	—	6.35	55.41	102.55	0.74Mo _{0.89} O ₂ +0.26Cr _{1.57} FeSr _{0.44} Si _{0.36}

Примечание. 1 — хромферрид (?); 2, 3 — Fe-Cr-минеральная фаза (?); 4 — оксид молибдена + Fe-Cr-минеральная фаза (?).

Note. 1 — chromferride (?); 2, 3 — Fe-Cr mineral phase(?); 4 — molybdenum oxide + Fe-Cr mineral phase (?).

В мусковит-хлорит-клинозоизитовых образованиях, развивающихся по амфиболитам и пересекающихся кварцевыми прожилками, наблюдается видимая вкрапленная минерализация пирита (до 3%). Пирит образует неправильной формы зерна или агрегаты зерен размером до 2 мм (рис. 5, а; табл. 1, № 7). Кроме пирита в породе встречаются редкие выделения ртутистого электрума, ютенбогаардит (?), самородного золота, молибденита и халькопирита, относящиеся к зернам эпидота. В виде включений в пирите присутствуют эпидот, халькопирит, борнит, акантит, акантит-гессит, науманнит-акантит, гессит и самородное серебро.

Ртутистый электрум имеет удлиненные зерна размером до 6 мкм (рис. 5, б; табл. 10, № 2). Ютенбогаардит (?) в ассоциации с высокопробным самородным золотом образует изометричные выделе-

ния размером до 5 мкм (рис. 5, с). Халькопирит и борнит встречаются в виде изометричных и удлиненных индивидов размером до 15 мкм (рис. 5, а; табл. 2, № 5, 6). Гессит, акантит-гессит и акантит образуют выделения размером до 2 мкм и встречаются в виде включений в пирите и на контактах зерен (рис. 5, d). Акантит, науманнит-акантит, гессит-акантит-науманнит и самородное серебро имеют размеры до 5 мкм, выполняют трещины и ассоциируются с гетитом (5, d–f).

В хлорит-кварц-клинозоизитовых породах сульфидная минерализация, представленная видимым пиритом, составляет около 2 %. Пирит имеет две разновидности. Первая из них кубической формы и размером 0.01–1.5 мм. Вторая изредка образует срастания с рипидолит-дафнитом (согласно классификации хлоритов [14]) и встречается в виде мелких гипидиоморфных

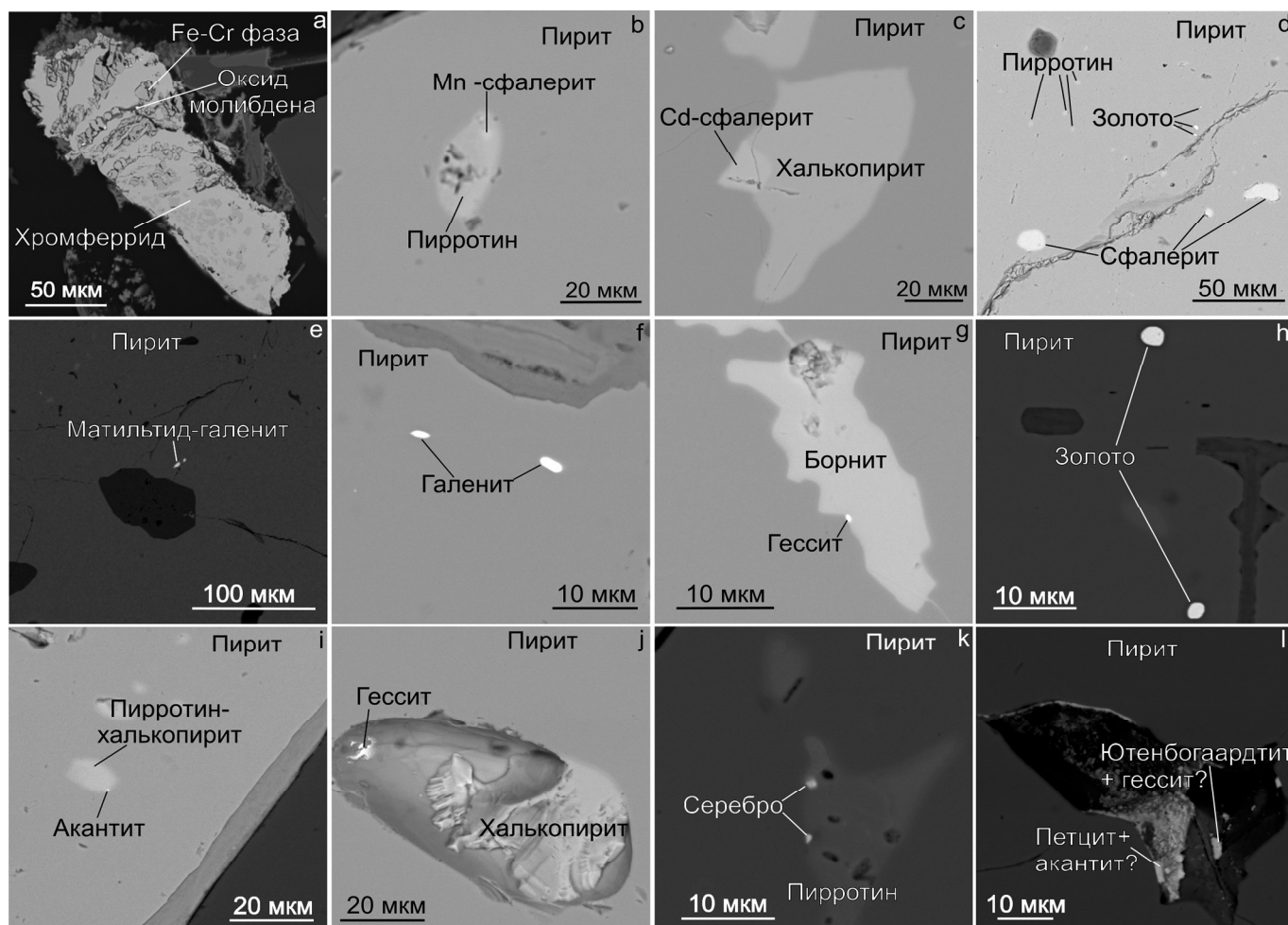


Рис. 3. Рудные минералы в окварцованных породах (а–л — пояснение в тексте)

Fig. 3. Ore minerals in quartzized rocks (a–l — explanation in the text)

Таблица 9. Химический состав сфалерита, мас. %

Table 9. The chemical composition of sphalerite, wt. %

	Fe	Cu	S	Mn	Cd	Zn	Сумма Sum	Формула Formula
1	14.4	1.95	33.74	0.27	2.48	45.09	101.8	$(\text{Zn}_{0.66}\text{Cd}_{0.01}\text{Fe}_{0.24}\text{Mn}_{0.04}\text{Cu}_{0.03})_{0.94}\text{S}$
2	3.06	—	31.4	—	2.59	58.64	95.69	$(\text{Zn}_{0.92}\text{Fe}_{0.06}\text{Cd}_{0.02})\text{S}$
3	2.6	—	32.7	—	2.65	59.23	97.18	$(\text{Zn}_{0.89}\text{Fe}_{0.05}\text{Cd}_{0.02})_{0.96}\text{S}$
4	9.48	0.75	33.75	—	1.36	55.49	100.83	$(\text{Zn}_{0.81}\text{Fe}_{0.16}\text{Cd}_{0.01}\text{Cu}_{0.01})_{0.99}\text{S}$
5	5.16	—	33.15	—	0.94	60.15	99.4	$(\text{Zn}_{0.89}\text{Fe}_{0.09}\text{Cd}_{0.01})_{0.99}\text{S}$
6	6.9	—	33.97	—	—	60.01	100.88	$(\text{Zn}_{0.87}\text{Fe}_{0.12})_{0.99}\text{S}$
7	9.3	—	35.02	—	—	56.36	100.68	$(\text{Zn}_{0.79}\text{Fe}_{0.15})_{0.94}\text{S}$
8	3.83	—	33.17	—	—	63.03	100.03	$(\text{Zn}_{0.94}\text{Fe}_{0.07})_{1.01}\text{S}$
9	9.43	—	33.09	—	—	62.6	105.12	$(\text{Zn}_{0.93}\text{Fe}_{0.16})_{1.09}\text{S}$

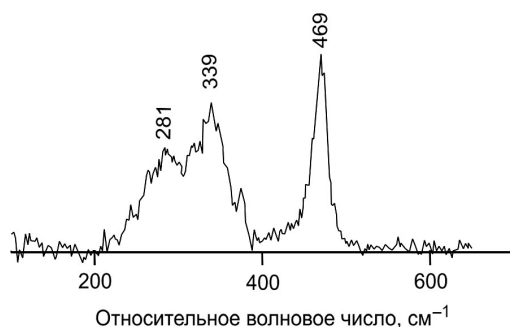


Рис. 4. КР-спектры борнита и ковеллина

Fig. 4. Raman spectra of bornite and covellite

и ксеноморфных зерен размером до 80 мкм с примесью кобальта до 8.48 % (рис. 6, а; табл. 1, № 8, 9) и с включениями халькопирита, клаустолит-галенита (табл. 6, № 8), меренскиит-мелонита (рис. 6, b; табл. 7, № 2, 3), меренскиита ((Pd,Pt)(Te,Bi)₂) и гессита. Клаустолит-галенит, меренскиит-мелонит и гессит имеют изометричную и вытянутую формы размером не более 3 мкм. Халькопирит образует неправильной формы выделения в пирите с размытыми, нечеткими границами. В породе также встречаются зерна пирита неправильной и изометричной формы размером до 70 мкм с примесью никеля, а также никеля и кобальта (рис. 6, с; табл. 1, № 10). Включение здесь представлено также галенитом.

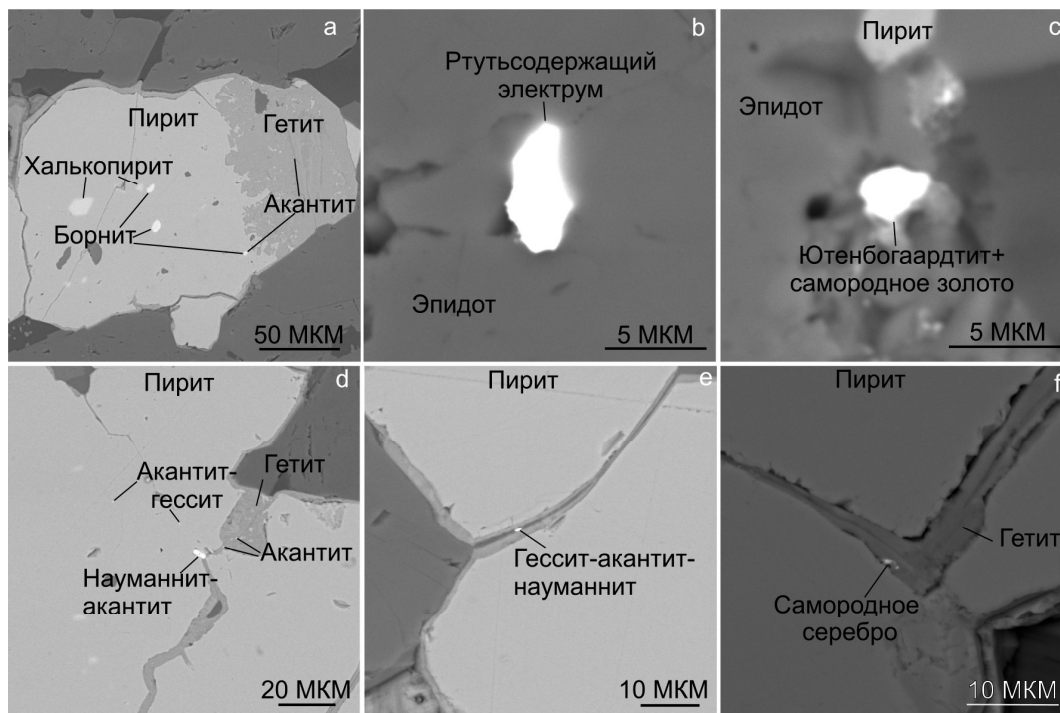


Рис. 5. Рудные минералы в кварцеванных мусковит-хлорит-клиноцоизитовых образованиях (а–f — пояснение в тексте)

Fig. 5. Ore minerals in quartz-muscovite-chlorite-clinocosite formations (a–f — explanation in the text)

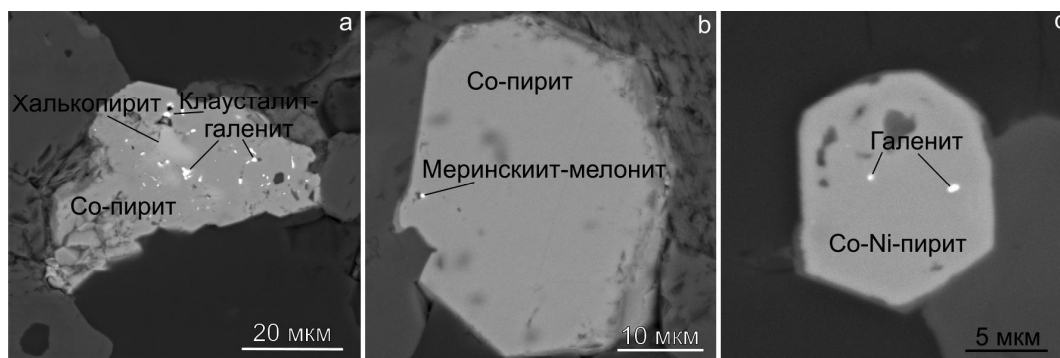


Рис. 6. Рудные минералы в хлорит-кварц-клиноцоизитовых породах

Fig. 6. Ore minerals in chlorite-quartz-clinoclastic rocks

Таблица 10. Химический состав электрума и золота, мас. %

Table 10. The chemical composition of electrum and gold, wt. %

	Au	Ag	Hg	Сумма Sum	Формула Formula
1	76.92	24.88	—	101.8	$Au_{0.68}Ag_{0.32}$
2	53.34	43.73	2.9	99.97	$Ag_{0.59}Au_{0.39}Hg_{0.02}$
3	83.65	15.88	—	99.53	$Au_{0.74}Ag_{0.26}$
4	83.52	16.57	—	100.09	$Au_{0.73}Ag_{0.27}$
5	83.32	15.89	—	99.21	$Au_{0.74}Ag_{0.26}$
6	83.91	15.91	—	99.82	$Au_{0.74}Ag_{0.26}$

Условия формирования рудных минералов

В изучаемых породах обнаруживаются ассоциации рудных минералов, принадлежащие к разным генерациям.

В клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцах наблюдаются как минимум 3 генерации рудных минералов. Первая представлена кубическим

пиритом, никельсодержащим пирротинном и пентландитом, а также, возможно, халькопиритом и молибденитом, которые содержатся в виде включений в пирите. Температура распада твердого раствора пирротина и пентландита меньше 425 °C [13], а рипидолит, ассоциирующий с пиритом, формируется, согласно разным геотермометрам, при температурах 245–335 °C [12], поэтому рассматриваемые рудные минералы можно отнести к высоко- и среднетемпературным образованиям, кристаллизовавшимся на ранних этапах изменения пород.

Вторая генерация представлена никельсодержащим пиритом и выделениями в нем халькопирита, мелонита, гессита и клаусталит-галенита. Они сформировались, скорее всего, при средних и низких температурах, так как пикнохлорит-брунсвит, образующий сращения с никельсодержащим пиритом, является низкотемпературным минералом (135–235° C [12]).

К третьей генерации минералов относятся низкотемпературные гессит, акантит и самородное серебро, которые кристаллизуются при температурах меньше 200 °C [6, 10, 16]. Приуроченность их к контактовым зонам и трещинам указывает на их позднюю кристаллизацию в гипогенных или гипергенных условиях.



В окварцованных породах намечаются две генерации рудных минералов. Одна из них характеризуется кристаллизацией пирита, галенита, сфалерита, пирротина, борнита, хромферрита, золота и твердых растворов: матильгид-галенита, халькопирит-сфалерита — и, судя по всему, сопряжена непосредственно с процессами окварцевания. Твердые растворы, встречающиеся в пиритах, образуются при средних и высоких температурах: матильгид-галенит — $>220^{\circ}\text{C}$ [17], $>350^{\circ}\text{C}$ [9], халькопирит-сфалерит — $>400^{\circ}\text{C}$ [13]. Содержание молекулярного вещества FeS в сфалерите, находящемся в равновесии с пиротином, также можно использовать в качестве геотермометра [4]. В равновесном состоянии с пиротином присутствуют, скорее всего, бескадмиевые сфалериты. В этих сфалеритах железистость (X_{FeS}) составляет от 7 до 16 %, что соответствует температурам формирования $220\text{--}440^{\circ}\text{C}$. Таким образом, кристаллизация рассматриваемых рудных минералов данной генерации происходила при высоких и средних температурах.

Акантит, гессит, петцит (?) и ютенбогаардит (?), приуроченные к контактовым зонам, могли образоваться при низкотемпературных гидротермальных процессах.

Акантит, гессит, акантит-гессит, акантит-науманнит-гессит и самородное серебро, ассоциирующиеся с гидроксидами железа, сформировались, скорее всего, при гипергенных изменениях. Ковеллин, замещающий борнит, также является гипергенным минералом.

В мусковит-хлорит-клиноцоизитовых породах наблюдаются предположительно 3 генерации рудных минералов. К первой, предположительно среднетемпературной, относятся пирит, халькопирит, борнит, ртутистый электрум и, возможно, самородное золото. Низкотемпературные акантит, акантит-гессит и ютенбогаардит, приуроченные к контактам минералов, могут быть низкотемпературными гидротермальными образованиями, а науманнит-акантит, гессит-акантит-науманнит и самородное серебро, ассоциирующие с гетитом, — гипергенными.

Таблица 11. Стадии формирования рудных минералов в измененных амфиболитах харбейского комплекса по руч. Скалистому

Table 11. Stages of the formation of ore minerals in altered amphibolites of the Harbey complex along Skalisty stream

Рудные минералы Ore minerals	Стадии формирования минералов Mineral formations stages			
	Гипогенная Hypogenic			Гипергенная Hypergenic
	I ($T\ 245\text{--}425^{\circ}\text{C}$)	II ($T\ 220\text{--}440^{\circ}\text{C}$)	III ($T\ 135\text{--}281^{\circ}\text{C}$)	IV ($T < 200^{\circ}\text{C}$)
Пирит / Pyrite	-----	-----		
Ni-пирит / Ni-pyrite			-----	
Со-пирит / Co-pyrite			-----	
Ni-пирротин / Ni-pyrrhotine	-----			
Пирротин / Pyrrhotine		-----		
Пентландит / Pentlandite	-----			
Халькопирит / Chalcopyrite	-----	-----	-----	
Молибденит / Molybdenite	-----	-----		
Матильгид-галенит / Matiltide-Galenite		-----		
Галенит / Galena		-----		
Клаусталит-галенит / Clausthalite-galena			-----	
Борнит / Bornite		-----		
Mn-сфалерит / Mn-sphalerite		-----		
Cd-сфалерит / Cd-sphalerite		-----		
Сфалерит / Sphalerite		-----		
Мелонит / Melonite			-----	
Меренскиит-мелонит / Merinskyite-melonite			-----	
Золото / Gold		-----		
Hg-электрум / Hg-electrum		-----		
Акантит / Acanthite			-----	-----
Акантит-гессит / Acanthite-hessite			-----	
Науманнит-акантит / Naumannite-acanthite				-----
Гессит / Hessite			-----	-----
Гессит-акантит-науманнит / Hessit-acanthite-naumanite				-----
Самородное серебро / Native silver				-----
Ковеллин / Covellite				-----
Ютенбогаардит (?) / Yutenbogaardtite (?)			-----	
Петцит (?) / Petcite (?)			-----	

В хлорит-кварц-клиноцоизитовых породах выявлены две генерации рудных минералов. Первая представлена кубическим пиритом, вторая — кобальт- и никельсодержащим пиритом, клаусталит-галенитом, халькопиритом, мелонит-меренскиитом и гесситом. Рипидолит-дафнит, образующий срастания с никельсодержащим пиритом, согласно разным геотермометрам [15, 18, 19], формируется при температурах 208–281 °С, а мелонит и меренскиит являются средне- и низкотемпературными образованиями, следовательно, вторая генерация рудных минералов в рассматриваемой породе является средне- и низкотемпературной.

На данном этапе исследования, на основании распределения рудных минералов в различной степени измененных амфиболитах харьбейского комплекса, а также температуры их формирования можно выделить несколько стадий последовательного рудного минералообразования (табл. 11). Наблюдаемая в клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых сланцах высоко- и среднетемпературная ассоциация минералов (I стадия): пирита, пентландита, никельсодержащего пирротина, халькопирита и молибденита — характеризуют, скорее всего, ранний этап гидротермально-метасоматических изменений в амфиболитах.

Четко фиксируются рудные минералы, сформировавшиеся сопряженно с кварцевыми прожилками и жилами под воздействием гидротермальных растворов (II стадия). Они образовались при высоких и средних температурах и представлены пиритом, матильдит-галенитом, сфалерит-халькопиритом, галенитом, сфалеритом, молибденитом, халькопиритом, борнитом, пирротин, хромферридом и золотом. Возможно, на этой же стадии сформировались среднетемпературные минералы — пирит, ртутистый электрум, самородное золото, молибденит, борнит и халькопирит — в окварцованных мусковит-хлорит-эпидотовых породах. Ассоциация золота и электрума с сульфидами и кварцем позволяет отнести рудные минералы этой стадии к золотосульфидно-кварцевой формации.

Никельсодержащий пирит, галенит, халькопирит, мелонит и клаусталит-галенит в сланцах, а также кобальт- и никельсодержащий пирит, клаусталит-галенит, халькопирит, гессит, меренскиит и меренскиит-мелонит в хлорит-кварц-клиноцоизитовых породах относятся, скорее всего, к одной поздней средне- и низкотемпературной стадии (III), связанной, возможно, с развитием в породах кальцита, пикнохлорит-брунгсвигита и рипидолит-дафнита. Возможно, данная стадия завершается формированием акантита, гессита, ютенбогаардтита и петцита, часто встречающихся на контактах сульфидов.

Во всех рассматриваемых породах выявлены низкотемпературные гипергенные минералы IV стадии: акантит, гессит, науманнит-акантит, акантит-гессит, самородное серебро и т. д.

Выводы

Изучены рудные минералы в различной степени метасоматически измененных амфиболитах харьбейского комплекса (руч. Скалистый): клиноцоизит-хлорит-мусковит-альбит-амфиболовых образованиях, окварцованных и эпидотизированных породах. Процессы хлоритизации (рипидолит) и альбитизации, по-видимому,

предшествовали формированию кварцевых жил и прожилков. Сульфидизация наиболее широко проявлена в окварцованных породах.

Рудные минералы отлагались в несколько стадий (минимум 4). Ранняя генерация рудных минералов наблюдается в сланцах, ассоциируется с рипидолитом и представлена высоко- и среднетемпературными пиритом, пентландитом, никельсодержащим пирротин, халькопиритом и молибденитом, сформировавшимися на раннем этапе гидротермально-метасоматического преобразования амфиболитов.

Следующая высоко- и среднетемпературная стадия формирования рудных минералов сопряжена с гидротермальными процессами и развитием кварцевых жил и прожилков. В это время образовались пирит, матильдит-галенит, галенит, сфалерит, молибденит, халькопирит, борнит, пирротин, хромферрид, ртутистый электрум и относительно низкопробное золото.

На средне- и низкотемпературной гидротермальной стадии формирования рудных минералов в породах кристаллизовались никель- и кобальтсодержащий пирит, халькопирит, галенит, клаусталит-галенит, гессит, мелонит, меренскиит и меренскиит-мелонит, ассоциирующие с пикнохлорит-брунгсвигитом и рипидолит-дафнитом. Заключительные низкотемпературные гидротермальные процессы привели к формированию в породах акантита, гессита и ютенбогаардтита.

Гипергенные изменения пород характеризуются образованием акантита, гессита, науманнит-акантита, гессит-акантит-науманнита, самородного серебра и ковеллина.

Авторы выражают благодарность д. г.-м. н. А. М. Пыстину, д. г.-м. н. В. И. Силаеву, к. г.-м. н. Р. И. Шайбекову, к. г.-м. н. С. И. Исаенко, Е. М. Тропникову и А. Е. Шмырову за помощь и консультации.

Литература

1. Глубинное строение Тимано-Североуральского региона / Отв. ред. А. М. Пыстин. Сыктывкар: Геопринт, 2011. 264 с.
2. Душин В. А., Сердюкова О. П., Малюгин А. А., Никулина И. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-42-VII, VIII (Обской). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 384 с.
3. Колганов Е. Р., Алексеенко И. О., Тельтевский В. А. Золотоносность Париквасьшорского участка // Уральская горная школа — регионам: Материалы междунауд. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2011. С. 13–14.
4. Куллеруд Г. Сульфидные системы как геологические термометры // Геохимические исследования. М., 1961.
5. Новгородова М. И., Горшков А. И., Трубкин Н. В., Цепин А. И., Дмитриева М. Т. Новые природные интерметаллические соединения железа и хрома — хромферид и ферхро-мид // ЗВМО. 1986. Часть 115. Вып. 3. С. 355–359.
6. Пальянова Г. А., Кох К. А., Серёткин Ю. В. Образование сульфидов золота и серебра в системе Au—Ag—S // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 4. С. 568–576.
7. Петровская Н. В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 347 с.
8. Пыстина Ю. И., Пыстин А. М. Цирконовая летопись уральского докембрия. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 168 с.



9. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания / Под ред. А. Г. Бетехтина. М.: Мир, 1962. 1132 с.
10. Савва Н. Е., Пальянова Г. А., Колова Е. Е. Минералы золота и серебра в зоне вторичного сульфидного обогащения (рудопоявление Крутое, Северо-Восток России) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2010. № 1. С. 33–45.
11. Уляшева Н. С. Метабазиты харьбейского комплекса (Полярный Урал) / Отв. ред. А. М. Пыстин. Сыктывкар: Геопринт, 2012. 98 с.
12. Уляшева Н. С. Метаморфизм, метасоматоз и рудная минерализация пород харьбейского метаморфического комплекса // Вестник ВГУ. Серия: геология. 2019. № 1. С. 47–57.
13. Филимонова А. А. Рудообразующие минералы и их сростания как геологические геотермометры // Минералогическая термометрия и барометрия. М.: Наука, 1965. С.37–48.
14. Hey M. H. A new review of chlorites: Min. Mag., 1954. V. 30, P. 277–292.
15. Hillier S., Velde B. Octahedral occupancy and chemical composition of diagenetic (low-temperature) chlorites. Clay Miner. 26, 1991. P.149–168.
16. Roy R., Majumdar A. J., Hulbe C. W. The Ag_2S and Ag_2Se transitions as geologic thermometers // Econ. Geol., 1959. V. 54. P. 1278–1280.
17. Van Hook H. J. The ternary system $\text{Ag}_2\text{S}-\text{Bi}_2\text{S}_3-\text{PbS}$ // Econ.Geol. 1960.V. 55. N 4. P. 759–788.
18. Xie X., Byerly G. R., Ferrell R. E. J. IIb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry // Contrib. Mineral. Petrol. 126, 1997. P. 275–291.
19. Zang W., Fyfe W. S. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahiágo Iddeposit, Carajás, Brazil // Mineral. Depos. 30, 1995. P. 30–38.
5. Novgorodova M.I., Gorshkov A.I., Trubkin N.V., Tsepin A.I., Dmitrieva M.T. *Novye prirodnye intermetallicheskie soedineniya zheleza i hroma-hromferid i ferhromid* (New natural intermetallic compounds of iron and chromium-chromferide and ferchromide). Proceedings of RMS, 1986, Part 115, Issue 3, pp. 355–359
6. Palyanova G. A., Kokh K. A., Seretkin Yu. V. *Obrazovanie sulfidov zlota i srebra v sisteme Au-Ag-S* (Formation of gold and silver sulfides in the Au–Ag–S system). Geology and Geophysics, 2011, V. 52, No. 4, pp. 568–576.
7. Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto* (Native gold). Moscow: Nauka, 1973, 347 p.
8. Pystina Yu.I., Pystin A. M. *Tsirkonovaya letopis uralskogo dokembriya* (Zircon chronicle of the Ural Precambrian). Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002, 168 p.
9. Ramdor P. *Rudnye mineraly i ih srastaniya* (Ore minerals and their intergrowths). Ed. A. G. Betekhtin, Moscow: Mir, 1962, 1132 p.
10. Savva N. E., Palyanova G. A., Kolova E. E. *Mineraly zlota i srebra v zone vtorichnogo sul'fidnogo obogascheniya (rudoproyavlenie Krutoe, Severo-Vostok Rossii)* (Minerals of gold and silver in the secondary sulfide concentration zone (Krutoe ore occurrence, North-East of Russia)). Vestnik SVNTs FEB RAS, 2010, No. 1, pp. 33–45.
11. Ulyasheva, N. S. *Metabazity harbeiskogo kompleksa (Polyarnyi Ural)* (Metabasites of the Harbey complex (Polar Urals)). N. S. Ulyasheva; Ed. A. M. Pystin. Syktyvkar: Geoprint, 2012, 98 p.
12. Ulyasheva N. S. *Metamorfizm, metasomatoz i rudnaya mineralizatsiya porod harbeiskogo metamorficheskogo kompleksa* (Metamorphism, metasomatism and ore mineralization of rocks of the Harbey metamorphic complex). Bulletin of VSU. Series: geology. 2019, No. 1, pp. 47–57.
13. Filimonova A. A. *Rudoobrazuyushchie mineraly i ih srastaniya kak geologicheskie geotermometry* (Ore-forming minerals and their intergrowths as geological geothermometers). Mineralogical thermometry and barometry. Moscow: Nauka, 1965, pp. 37–48.
14. Hey, M. H. A new review of chlorites: Min. Mag., 1954, V. 30, pp. 277–292.
15. Hillier S., Velde B. Octahedral occupancy and chemical composition of diagenetic (low temperature) chlorites. Clay Miner. 26, 1991, pp. 149–168.
16. Roy R., Majumdar A. J., Hulbe C. W. The Ag_2S and Ag_2Se transitions as geologic thermometers. Econ. Geol., 1959, V. 54, pp. 1278–1280.
17. Van Hook H.J. The ternary system $\text{Ag}_2\text{S} - \text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{PbS}$. Econ.Geol. 1960,V. 55, No. 4, pp. 759–788.
18. Xie, X., Byerly G. R., Ferrell R. E. J. IIb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry. Contrib Mineral Petrol. 126, 1997, pp. 275–291.
19. Zang W., Fyfe W. S. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahiágo Iddeposit, Carajás, Brazil. Mineral Depos. 30, 1995, pp. 30–38.

References

Поступила в редакцию / Received 07.01.2020



ФОСФОР В КАРБОНАТНЫХ ПОРОДАХ

Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис, Н. В. Рыбина

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
eyuya@yandex.ru

Путем статистической обработки более 7000 полных силикатных анализов вычислены новые, более достоверные кларки фосфора (P_2O_5 и P , %) и фосфорных модулей ФТМ (фосфор-титанового), ФКМ (фосфор-кальциевого), ФЖМ и ФОЖМ (фосфор-железного и фосфор-общезелезного) для карбонатных пород и их аналогов — неконсолидированных молодых осадков и карбонатных параметаморфитов. Эти кларки оказались заметно более низкими, чем у предшественников. Впервые выполнен анализ корреляций содержаний фосфора и значений фосфорных модулей с породообразующими компонентами карбонатных пород, что позволило прояснить механизм накопления в них фосфора.

Ключевые слова: геохимия фосфора, фосфорные модули, кларки, корреляционный анализ.

PHOSPHORUS IN CARBONATE ROCKS

Ya. E. Yudovich, M. P. Ketris, N. V. Rybina

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

By statistical processing of more than 7000 complete silicate analyses new, more reliable Clarkes of Phosphorus (P_2O_5 and P , %) and phosphorus modules for carbonate rocks and their analogues (unconsolidated young sediments and carbonate metamorphites) were calculated. These Clarkes were noticeably lower than previously calculated. For the first time, a correlation analysis of phosphorus content and values of phosphorus modules with rock-forming components of carbonate rocks was performed, which allowed to clarify the mechanism of phosphorus accumulation.

Keywords: Phosphorus geochemistry, phosphorus modules, Clarkes, correlation analysis.

Настоящая статья основана на материалах, которые в значительно дополненном виде будут рассмотрены в подготовленной к печати монографии. Карбонатными считались все породы, в которых количество карбонатного вещества составляло не менее 50 % по массе. Поэтому в статистическую совокупность для расчета кларка попали как нормальные известняки и доломиты, так и некоторые мергели [17]. Кроме того, рассмотрены «аналоги» карбонатных пород, то есть неконсолидированные современные осадки и карбонатные параметаморфиты — мраморы и кальцифиры [14].

Методика работы

Для оценки кларков фосфора мы использовали среднее медианное содержание (Me). Вычисленные средние по выборкам карбонатных пород или их аналогов использовались для построения частотных гистограмм (рис. 1), аналогично тому, как это описано [16, 19, 20].

Поскольку большинство использованных статистических совокупностей не соответствуют нормальному распределению, использование величины σ (среднего квадратичного отклонения) становится сомнительным. Поэтому для определения 95 % околосреднего интервала вокруг медианы мы использовали формулу:

$$Me \pm 1.57(Q_3 - Q_1)/\sqrt{N},$$

где Me — медиана, Q_3 и Q_1 — третий и первый квартили, N — численность выборки (в нашем случае — число выборочных средних) [23]. Содержания фосфора менее

или более околосреднего интервала считались нами соответственно ниже- или вышекларковыми.

Помимо оценок медианы для P_2O_5 и P , для характеристики трех важнейших корреляций фосфора (с титаном, железом и кальцием) вычислялись следующие 4 модуля:

ФТМ — фосфор-титановый модуль,	P_2O_5/TiO_2
ФКМ — фосфор-кальциевый модуль,	P_2O_5/CaO
ФЖМ — фосфор-железный модуль,	P_2O_5/Fe_2O_3
ФОЖМ — фосфор-общезелезный модуль,	$P_2O_5/Fe_2O_3 + FeO$

Всего по карбонатным осадкам (15 выборок), карбонатным породам (209 выборок) и метакарбонатным породам (66 выборок) нами статистически обработано около 7000 полных силикатных анализов.

Карбонатные осадки

Известно, что в осадках преобладает биогенный фосфор — $P_{\text{био}}$, имеющий две главные формы — фосфор органического вещества $P_{\text{орг}}$ и фосфор скелетных остатков — $P_{\text{мин}}$. В относительно мелководных шельфовых и гемипелагических осадках, накапливавшихся с высокой скоростью, в балансе общего фосфора преобладает $P_{\text{орг}}$, а в пелагических осадках, отлагавшихся с малой скоростью, преобладает биогенный $P_{\text{мин}}$. По мере диагенеза и разложения ОВ былой $P_{\text{орг}}$ покидает осадок и отчасти возвращается в наддонную воду, а отчасти фиксируется на железном, кальциевом или титановом барьерах в виде минерального фосфора $P_{\text{мин}}$. Но в

Для цитирования: Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Рыбина Н. В. Фосфор в карбонатных породах // Вестник геонаук. 2020. 3(303). С. 14—21. DOI: 10.19110/geov.2020.3.2.

For citation: Yudovich Ya. E., Ketris M. P., Rybina N. V. Phosphorus in carbonate rocks. Vestnik of Geosciences, 2020, 3(303), pp. 14—21. DOI: 10.19110/geov.2020.3.2.

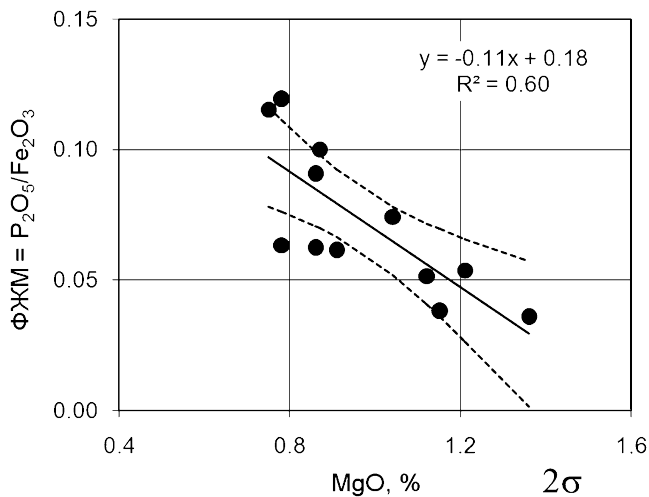


Рис. 1. Негативная корреляция фосфор-железного модуля ФЖМ с магнием в существенно карбонатных осадках Галапагосской рифтовой зоны. Построено по данным А. А. Мигдисова и др., 1983 г. [25]

Fig. 1. Negative correlation of the phosphorus-iron module FGM with magnesium in significantly carbonate sediments of the Galapagos rift zone. Composed according to A. A. Migdisov et al., 1983 [25]

целом вынос фосфора в процессе литификации осадка ведет к тому, что осадочные породы оказываются беднее фосфором, чем породившие их осадки.

Наиболее богаты фосфором терригенные морские и океанские осадки, особенно самые глинистые. Осадки кремнистые в целом беднее терригенных, а наиболее бедны фосфором чистые карбонатные осадки [20].

Самой характерной для целого ряда осадков является негативная корреляция фосфор-железного модуля ФЖМ с магнием, не имеющая ясного истолкования. Другие корреляции (например, позитивная связь фосфора с щелочами или с титаном при одновременном антагонизме фосфора с кремнием) вполне понятны — они объясняются тяготением фосфора к глинистому компоненту осадков [20].

Е. С. Севастьянова и В. Н. Свальнов изучили распределение фосфора в глубоководных осадках восточной части Индийского океана. Карбонатные осадки оказались наиболее бедны фосфором: фораминиферовые — 0.25 (0.017–0.033) % Р и кокколитовые — 0.046 (0.034–0.058) % Р [13, с. 1045].

Черное море особо привлекало исследователей геохимии фосфора — как возможная актуалистическая модель формирования фосфоритов. По старым данным Н. М. Страхова (1947 г.), среднее содержание Р (пересчитанное Э. А. Остроумовым и И. И. Волковым на P_2O_5) в осадках Черного моря составляет (%): мидиевые илы — 0.23, фазеолиновые илы — 0.23, глубоководные серые глины — 0.25, глубоководные глинистые пески — 0.23, переходный ил — 0.23, известковый ил — 0.16. Итак, только в известковых осадках содержание фосфора явственно пониженное, в прочих осадках оно примерно одинаково. В дальнейшем (1957 г.) Э. А. Остроумов и И. И. Волков изучили распределение P_2O_5 по вертикали черноморских осадков на 12 станциях [9].

Согласно Г. Н. Батурину [3, 4], в некоторых шельфовых фациях современного океана происходит образование фосфоритов. Этот процесс протекает в 4 этапа: 1) поставка фосфора на шельф апвеллингом; 2) осаж-

дение фосфора на дно в составе биогенного детрита; 3) диагенетическое перераспределение рассеянного фосфора в осадках; 4) вторичное обогащение за счет перемива фосфатоносных осадков. Помимо шельфовой, вторая локализация фосфоритов в современном океане — это метасоматическая фосфатизация карбонатных пород подводных гор открытого океана. Причины такой фосфатизации остаются неясными, но И. О. Мурдмаа отдает предпочтение глубинному апвеллингу [8, с. 277–278].

Корреляции фосфора изучались нами в группе существенно карбонатных пелагических и терригенно-карбонатных морских осадков. Эта группа включает осадки Галапагосской рифтовой зоны и окраинных морей востока Азии, в том числе Японского моря. В галапагосских осадках [25], содержащих 0.11 % P_2O_5 ($n = 12$), отмечается негативная корреляция магния с фосфор-железным модулем ФЖМ (рис. 1). Такая же зависимость наблюдается по средним данным в карбонат-содержащих осадках субтропической и тропической зон ($CaO = 18.59$ %) окраинных морей востока Азии, содержащих 0.14 % P_2O_5 ($n = 5$ и $N = 31$) [2, 6]. Эта корреляция подтверждается антагонизмом фосфора и кремния, показывающим, что носителем фосфора является здесь карбонатное вещество.

Карбонатные породы

Наиболее важной работой по кларковой геохимии фосфора в карбонатных породах надо считать статью А. Б. Роннова и Г. А. Корзиной [11]. На основе анализа 289 средних проб карбонатных пород, составленных из 10339 образцов, они нашли, что содержание P_2O_5 в них составляет от 0.025 (аридные, пелагические) до 0.129 % (гумидные, прибрежно-морские). Фосфор считают биогенным, поскольку в распределении по стратиграфической шкале фосфор, рассеянный в карбонатных породах, следует за органическим углеродом [11, с. 683].

Среднемедианные значения для совокупности всех карбонатов, полученные нами на основании 209 выборок (рис. 2), составляют для P_2O_5 , ФТМ, ФКМ, ФЖМ и ФОЖМ соответственно (0.050 ± 0.008) % (или 0.022 ± 0.003 для элементарного Р), 0.438 ± 0.057 , 0.0014 ± 0.0003 , 0.067 ± 0.008 и 0.034 ± 0.004 . Таковы наши оценки кларков для карбонатных пород, которые оказались вдвое более низкими по сравнению с кларками предшественников. Естественно, что вследствие максимального содержания СаО фосфор-кальциевый модуль ФКМ — самый низкий среди осадочных пород, а фосфор-титановый ФТМ — очень высокий вследствие убогой титанности большинства карбонатов.

В общем, большинство карбонатных пород бедно фосфором; в частности, кларк фосфора в карбонатах втрое ниже, чем в пелитах (P_2O_5 — 0.05 против 0.14 %). Это значит, что, несмотря на экспериментально доказанную способность свежесоздаваемых карбонатов к сорбции фосфата, этот процесс на кларковом уровне лимитировался малым количеством доступного фосфата в наддонных или поровых водах.

В области **нижекларковых** содержаний фосфора заслуживают внимания среднеордовикские карбонаты о-ва Вайгач. Здесь в общей совокупности ($n = 80$, $P_2O_5 = 0.02$ %) глинистых карбонатных пород [21, с. 161]

Карбонатные породы / Carbonate rocks

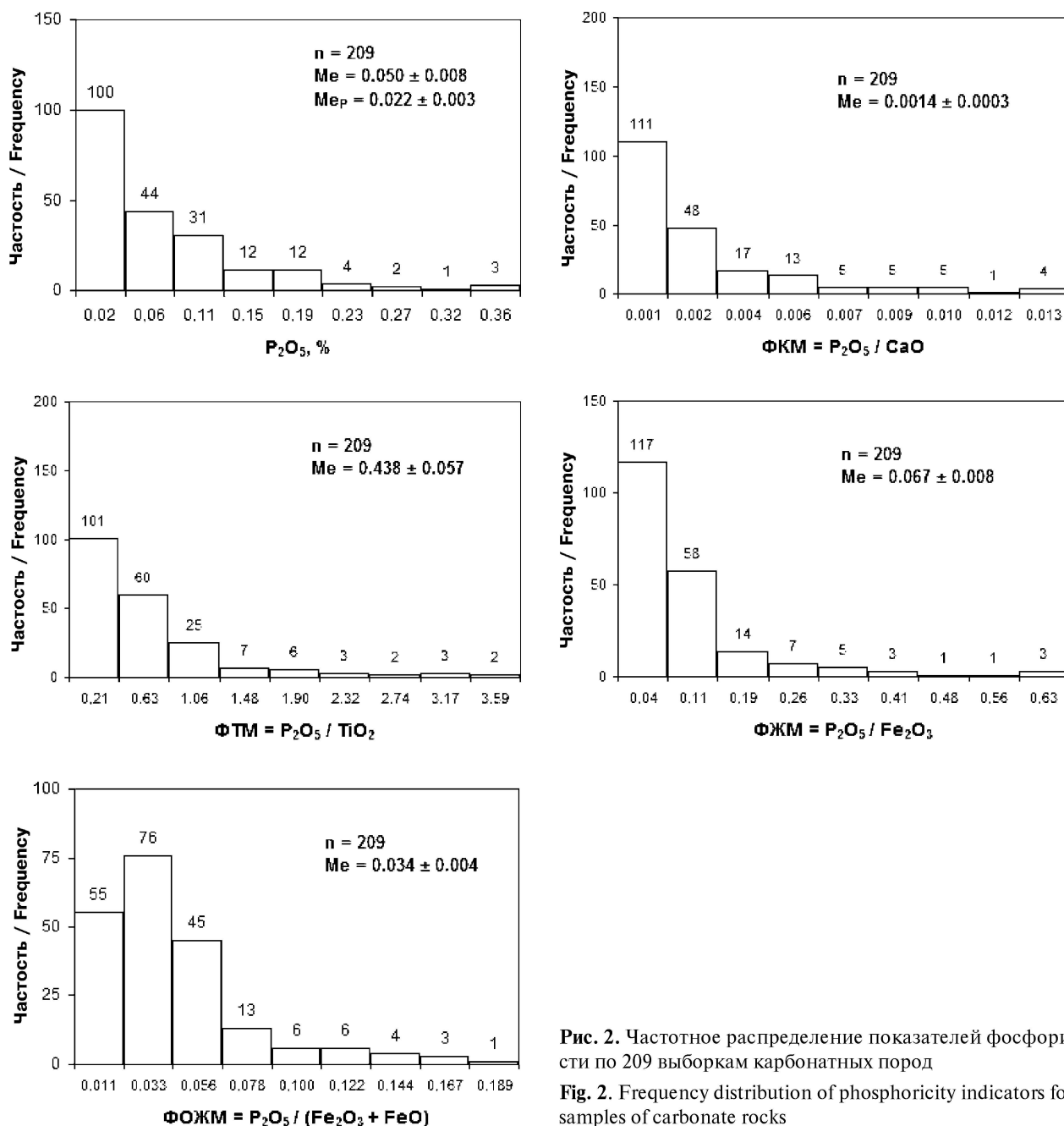


Рис. 2. Частотное распределение показателей фосфористости по 209 выборкам карбонатных пород

Fig. 2. Frequency distribution of phosphoricity indicators for 209 samples of carbonate rocks

наблюдается позитивная корреляция фосфора с алюминием (рис. 3, а), а в частной выборке существенно известковых пород ($n = 54$, $P_2O_5 = 0.03$ %) — негативная корреляция с карбонатностью (рис. 3, б). Обе связи означают одно и то же: прирост фосфатности по мере увеличения глинистости карбонатных пород. Эта же закономерность выражается в частной выборке глинистых доломитовых известняков ($n = 21$, $P_2O_5 = 0.03$ %), где фосфор коррелирует с титаном.

В общей совокупности ($n = 60$, $P_2O_5 = 0.02$ %) верхнеордовикских карбонатов на о-ве Вайгач [21, с. 164] наблюдается позитивная корреляция фосфора с щелочами, а в частной выборке глинистых доломитовых известняков ($n = 14$, $P_2O_5 = 0.02$ %) — позитивная корреляция фосфор-железного модуля ФЖМ с модулем нормированной щелочности НКМ. Обе корреляции, по видимому, отражают прирост фосфора по мере роста терригенной примеси в чистых карбонатах. Это под-

тверждается и значимой (хотя и сильно размытой) связью фосфора с титаном в частной выборке существенно известковых пород ($n = 50$, $P_2O_5 = 0.02$ %).

В числе других выборок со значимыми корреляциями нижекларкового фосфора — силурийские карбонаты Кожимской площади на Приполярном Урале [21, с. 166], нижнесилурийские, лудловские и верхнедевонские — на том же о-ве Вайгач [21, с. 169, 170, 206]. В этих выборках проявляются позитивные корреляции фосфора с некарбонатными компонентами пород — с алюминием или титаном, иногда и с натрием.

В области **околокларковых** содержаний фосфора заслуживают внимания рифейские карбонатные породы Башкирского мегантиклинория [1, с. 106–112]. В общей совокупности глинистых известняков и доломитов ($n = 37$, $P_2O_5 = 0.05$ %) наблюдается сильно размытая негативная корреляция фосфора с CaO, т. е. накопление фосфора по мере убывания карбонатности пород (или,

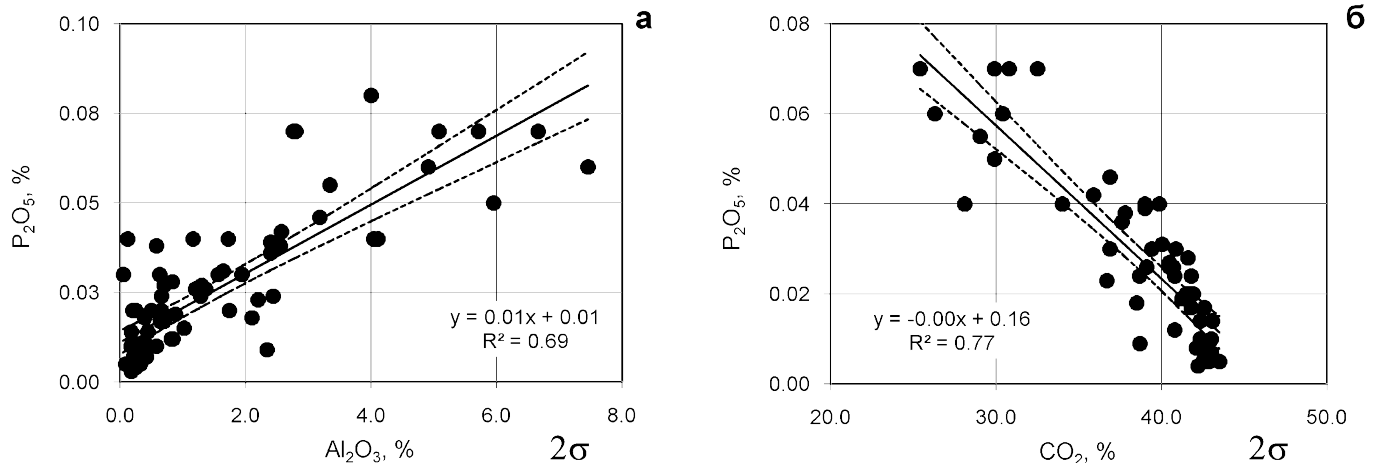


Рис. 3. Корреляции фосфора в среднеордовикских глинистых карбонатах о-ва Вайгач: с алюминием в общей совокупности (а), с карбонатностью в существенно известковых породах (б). Построено по данным М. Б. Птицына и др., 1983 г. [21, с. 161]

Fig. 3. Correlations of phosphorus in the middle Ordovician clay carbonates of the Vaigach Island: with aluminum in the general population (a), with carbonate in substantially calcareous rocks (b). Composed according to M. B. Ptitsyn et al., 1983, [21, p. 161]

что то же самое, прирастания глинистости). В частной выборке глинистых доломитов ($n = 7$, $P_2O_5 = 0.06\%$) отмечается позитивная корреляция фосфор-железного модуля ФЖМ с СаО, означающая прирост гидроксидно-сорбированного фосфора по мере нарастания карбонатности (или убывания глинистости).

В совокупности средних составов ($m = 11$, $n_m = 1305$, $P_2O_5 = 0.04\%$) нижнерифейских магнезитонесных доломитов Южного Урала [15, с. 104–105] фосфор позитивно коррелирует с окисным железом (рис. 4) и негативно, хотя и слабо, — с магнием¹. Видимо, присутствие в доломитах примеси магнезита (показатель MgO/CaO нередко превосходит доломитовую норму 0.72) не способствует накоплению гидроксидного носителя фосфора.

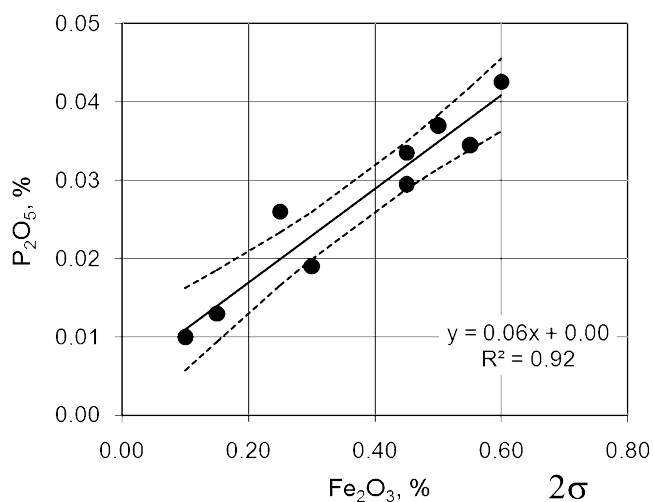


Рис. 4. Позитивная корреляция фосфора с окисным железом в нижнерифейских магнезитонесных доломитах Южного Урала. Средние данные. Построено по данным Л. П. Урасиной и др., 1993 г. [15, с. 104–105]

Fig. 4. Positive correlation of phosphorus with iron oxide in the lower Riphean magnesite-bearing dolomites of the South Ural's. Average data. Composed according to L. P. Urasina et al., 1993 [15, p. 104–105]

¹При построении графиков были исключены два средних состава с содержанием $Fe_2O_3 > 1\%$.

Из числа других выборок со значимыми корреляциями околоскарпового фосфора [20, с. 221–325] назовем примеры в нашем регионе Приполярного Урала: ордовикские карбонаты на Ичет-Ляге, притоке Илыча, и девонские карбонаты на Кожимской площади. В них можно видеть примерно такие же эмпирические закономерности, что и отмеченные выше.

В области **вышекларковых** содержаний фосфора заслуживает внимания малая совокупность ($n = 5$, $P_2O_5 = 0.59\%$) богатых фосфором среднеордовикских доломитисто-известковых мергелей Печорского Урала, содержащих бертьериновые («шамозитовые») оолиты [22, с. 29]. Здесь фосфор показывает сильную негативную корреляцию с магнием (рис. 5) и более слабую позитивную корреляцию с окисным железом. Последнее вполне ожидаемо, так как очевидно, что носителем фосфора здесь являются именно железистые оолиты. Поскольку бертьериновые оолиты — это продукт размыва гумидной коры выветривания на близлежащей суши [22], то приходится заключить, что сорбции фосфора на выне-

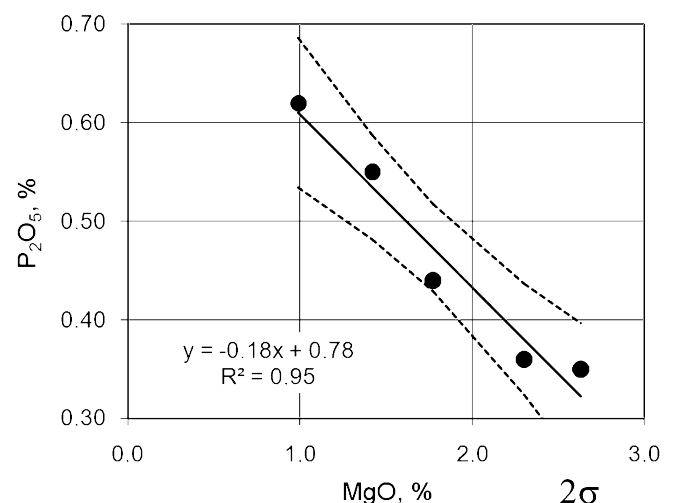


Рис. 5. Негативная корреляция фосфора с магнием в содержащих бертьериновые оолиты среднеордовикских мергелях на р. Илыч. Наши данные, 1981 г. [22, с. 29]

Fig. 5. The negative correlation of phosphorus with magnesium in the berthierine-bearing oolites in the middle Ordovician marls on the Ilych river. Our data, 1981 [22, p. 29]

сенных при размыве этой коры гидроксидах железа не благоприятствовал небольшой прирост магнезиальности известняков (среднее содержание MgO составляет всего лишь 1.82 %).

В числе других выборок со значимыми корреляциями вышекларкового фосфора или фосфорных модулей можно назвать [20, с. 221–325]: глинистые карбонаты и мергели нижнекембрийской орогенной молассы (меркушевская свита) на Ханкайском массиве Приморья; слабуглинистые и глинистые известняки и доломиты, а также мергели трех свит быстринской серии верхнего рифея на Тимане; фанерозойские карбонаты Юж. Верхоянья; бокситоносные карбонатные толщи на Ср. Тимане; фаменские марганценовые кремнистые карбонаты Пай-Хоя; потенциально алмазонасные пермские мергели Ю.3. Притиманья. В этих примерах наблюдаемые корреляции обычно требуют допускать как минимум два носителя фосфора: глинистый и гидроксидный, причем второй может быть (как на Пай-Хое) и гидротермальным.

Метаморфические карбонаты

Среднемедианные значения фосфористости для совокупности древних метакарбонатных пород были получены на основании 66 выборок, охватывающих более 300 анализов, и для P_2O_5 , ФТМ, ФКМ, ФЖМ и ФОЖМ соответственно (0.065 ± 0.017) (или 0.029 ± 0.008 % для элементарного Р), (0.435 ± 0.122), (0.002 ± 0.001), (0.099 ± 0.026) и (0.036 ± 0.008) %.

Среди метакарбонатов с **околокларковыми** содержаниями фосфора назовем древние кальцитовые мраморы с диопсидом, плагиоклазом, тремолитом и флогопитом, описанные на УКЩ по р. Тетерев [10], где в общей совокупности при нормальной фосфатности ($P_2O_5 = 0.06$ %, $n = 14$) устанавливается негативная связь фосфора с карбонатностью (рис. 6, а) и, соответственно, позитивная с большинством остальных некарбонатных компонентов, в частности со щелочами (рис. 6, б). Найденные корреляции означают одно и то же — носителем фосфора является силикатное (а не карбонатное) вещество этих мраморов.

Из числа выборок метакарбонатов с **вышекларковыми** содержаниями фосфора отметим песчанистые метакарбонаты раннепротерозойских свит соаварви и хирвинаволоков в Сев. Карелии [10]. Здесь при заметной фосфатности ($P_2O_5 = 0.10$ %, $n = 15$) выявляется корреляция фосфор-кальциевого модуля ФКМ (то есть фактически — апатитового фосфора) с щелочами.

Обсуждение данных

Поскольку главным источником кларкового фосфора карбонатных пород был биогенный фосфор $P_{био}$ остаточного органического вещества, то причиной дефицита растворенного фосфата при карбонатной седиментации был дефицит ОВ в карбонатном осадке, ибо большая часть исходного ОВ карбонатных фоссилий разлагалась, еще не достигая дна бассейна. В итоге чистые карбонатные осадки оказывались почти стерильными по фосфору. Лишь в аноксических обстановках, в которых формировались карбонатные осадки с повышенным содержанием $C_{орг}$ (будущие черные сланцы) фосфор мог концентриро-

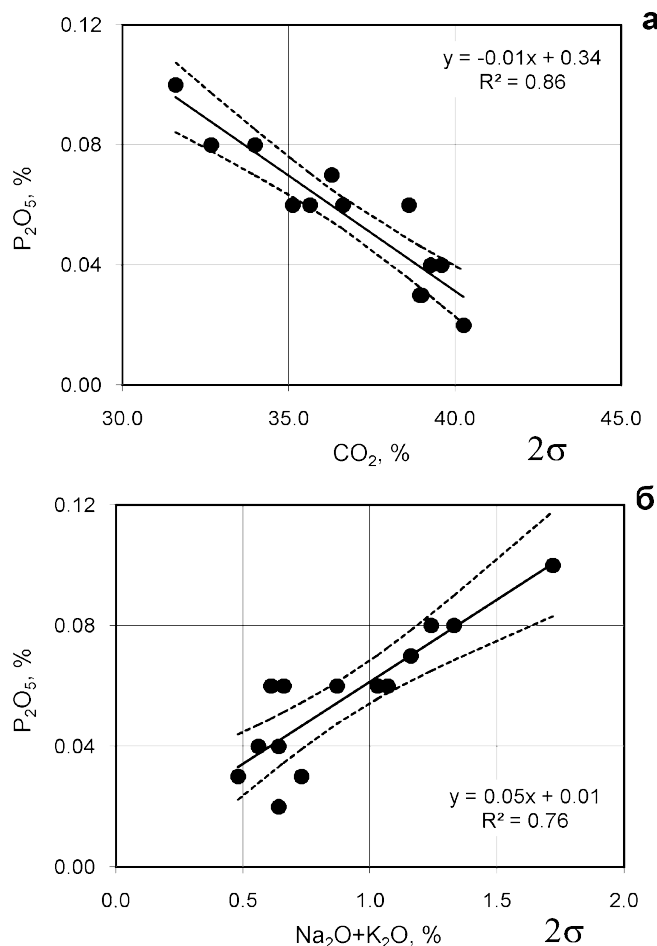


Рис. 6. Корреляции фосфора в мраморах УКЩ: с карбонатностью (а) и щелочами (б). Построено по данным Н. И. Половко и др., 1975 г. [10, с. 38–39]

Fig. 6. Correlation of phosphorus in the marbles of the Ukraine Shield: with carbonate content (a) and alkalis (b). Composed according to N. I. Polovko et al., 1975 [10, p. 38–39]

ваться в вышекларковых количествах — даже в чистых карбонатных породах.

Однако в большинстве случаев повышение содержания фосфора наблюдается не в чистых, а в смешанных карбонатно-силикатных породах, в частности в мергелях. Эта закономерность была отмечена еще в сводке Ф. Кларка 1924 г. [24]. В среднем составе чистых известняков ($n = 345$), содержащих 5.10 % SiO_2 и 0.81 % Al_2O_3 , им было найдено 0.04 % P_2O_5 , а в более глинистых «строительных известняках» ($n = 498$), содержащих 14.09 % SiO_2 и 1.75 % Al_2O_3 — на порядок больше, 0.42 % P_2O_5 . Подтверждая эти данные, ученики Я. В. Самойлова² — В. А. Зильберминц и В. П. Маслов в 1928 г. нашли для чистых известняков карбона Донбасса ($n = 543$) с выходом нерастворимого остатка 4.10 % (в среднем 0.05 %) P_2O_5 , а для 32 проб известняков более глинистых, с выходом н.о. 17.2 % — вчетверо больше, 0.22 % P_2O_5 [7, с. 110–112].

Исследование корреляций фосфора часто выявляет позитивную корреляцию P_2O_5 с Al_2O_3 и TiO_2 , а нега-

²Для того, чтобы устроиться к Вернадскому в Московский университет, Якову Фишелевичу Шмюлю пришлось креститься, и Вернадский стал его крестным отцом. Так в 1895 г. у Вернадского появился сотрудник, известный нам как Яков Владимирович Самойлов.



тивную — с СаО и особенно с MgO. Это указывает на концентрацию фосфора в некарбонатных компонентах пород — обычно глинистых, реже алевритовых, при разбавляющей роли карбонатной матрицы. Лишь в условиях лавинной седиментации (как в орогенных молассах) ОВ карбонатных осадков могло предохраняться глинистыми покрывками от быстрого окисления, что обеспечивало лучшую сохранность $P_{\text{био}}$ в карбонатном осадке.

Таким образом, наше исследование позволяет дополнить вывод А. Б. Ронина [11]: главными носителями кларкового фосфора в карбонатных породах является не только остаточное ОВ, но, по-видимому, также и силикатно-сорбированный фосфор в глинистом веществе. Реже можно допускать участие и гидроксидно-сорбированного фосфора, хотя доля такого фосфора обычно также позитивно коррелируется с количеством силикатной примеси в карбонатной породе. Иногда, впрочем, наблюдалась и обратная картина — позитивная корреляция модуля ФЖМ с карбонатностью.

Накопление фосфора в карбонатных породах может быть обусловлено сорбцией фосфата на веществе карбонатных осадков. Этот процесс экспериментально изучался А. В. Савенко [12]. Она осаждала фосфат, растворенный в искусственной морской воде (начальные концентрации фосфата составляли 3, 6 и 9 мкмоль/л) на получаемой путем добавок бикарбоната натрия взвеси CaCO_3 . Эти эксперименты моделировали процесс захвата фосфата из поровых вод в диагенезе карбонатного осадка. В согласии с ранее имевшимися данными выяснилось, что свежесаженный карбонат захватывает фосфат тем сильнее, чем выше исходная концентрация фосфата и чем ниже карбонатная щелочность. Например, при исходной концентрации фосфата 3.02 мкмоль/л и при щелочности 9.0 мг-экв/л осадок CaCO_3 содержал всего 0.057 % Р, а при соответствующих цифрах 9.01 мкмоль/л и 6.0 мг-экв/л — на порядок больше, 0.71 % Р. Поэтому проведенные эксперименты позволили заключить [12, с. 743]:

«Концентрация фосфора в диагенетическом CaCO_3 может достигать 0.5–0.7 мас. %, и процессы соосаждения фосфора с CaCO_3 , по-видимому, являются важным фактором, контролирующим концентрацию фосфора в поровых растворах осадков морей и океанов, испытавших интенсивный диагенез».

Рассеянный фосфор, захваченный карбонатным веществом, в диагенезе может сконцентрироваться в виде фосфатных конкреций или иных конкрецеподобных обособлений — как в существенно карбонатных породах, так и в существенно терригенных. К этому надо добавить давно известную существенную разницу между способностью к прочной сорбции фосфата между кальцитом и доломитом. Дело в том, что сорбированный карбонатом фосфат со временем превращается во франколит с общей формулой $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3[\text{CO}_3]$ (F, Cl, OH), растворимость которого несколько ниже растворимости чистого CaCO_3 , что и обуславливает сохранение сорбированного фосфата в карбонатном осадке (а затем в литифицированной карбонатной породе). Однако присутствие в среде мелких ионов Mg^{2+} аморфизует кристаллическую структуру карбоната кальция, что провоцирует десорбцию, поскольку сильно повышает растворимость магнезийсодержащего кальциевого фосфата [18, с. 198].

Существует также экспериментально доказанная разница в сорбционном поведении полиморфов карбоната кальция — кальцита и арагонита [18, с. 185]. Особенности этих процессов таковы, что в закрытой системе (ограниченный ресурс фосфата) в первую очередь будет фосфатизироваться арагонитовый материал (и фосфат получится стронциеносным), а в открытой (свободный обмен с наддонной водой) более важным осадителем фосфора постепенно станет кальцит (если, конечно, в осадке присутствуют оба карбоната). Поэтому, как отмечают В. З. Блисковский и Д. А. Минеев [5], «из фосфоритов наиболее богаты стронцием органогенные образования», т. е. ракушечные фосфориты.

Экспериментальные данные находятся в согласии с натурными наблюдениями. В частности, как подчеркнул И. И. Волков (1973 г.), содержание Р в кокколито-вых черноморских илах (0.08 %) явно аномально высоко, тогда как содержание фосфата в поровых водах аномально низко. При этом экспериментами К. Гленна и М. Артура (1985 г.) была установлена тесная корреляция между скоростями накопления CaCO_3 и минерального фосфора $P_{\text{мин}}$. В совокупности обе закономерности доказывают сорбцию фосфата на карбонатных остатках нанопланктона [18, с. 184].

Метакарбонаты оказались несколько богаче фосфором, чем неметаморфизованные карбонаты. Причину, по-видимому, надо искать не в метаморфизме, поскольку практически все мраморы и кальцифиры — образования докембрийские, даже архейские. Вполне возможно, что первичные карбонатные осадки этого возраста формировались в бассейнах, воды которых были богаче фосфором, нежели в фанерозое.

Заключение

Рассмотренные материалы позволяют сделать несколько выводов.

1. Среднемедианные значения для совокупности карбонатных пород, полученные на основании 209 выборок, составляют для P_2O_5 , ФТМ, ФКМ, ФЖМ и ФОЖМ соответственно $(0.050 \pm 0.008) \%$ (или 0.022 ± 0.003 для элементарного Р), 0.438 ± 0.057 , 0.0014 ± 0.0003 , 0.067 ± 0.008 и 0.034 ± 0.004 . Эти цифры можно считать нашими оценками кларков для карбонатных пород, которые оказались вдвое более низкими по сравнению с кларками предшественников. Естественно, что вследствие максимального содержания СаО фосфор-кальциевый модуль ФКМ — самый низкий среди осадочных пород, а фосфор-титановый ФТМ — очень высокий вследствие убогой титанистости большинства карбонатов.

2. В общем, большинство карбонатных пород бедно фосфором. Это значит, что, несмотря на экспериментально доказанную способность свежесаженных карбонатов к сорбции фосфата, этот процесс на кларковом уровне лимитировался малым количеством доступного фосфата в наддонных или поровых водах.

3. Поскольку, как было показано в основополагающей работе А. Б. Ронина и Г. А. Корзиной [11], главным источником кларкового фосфора карбонатных пород был биогенный фосфор $P_{\text{био}}$ остаточного органического вещества, то причиной дефицита растворенного фосфата при карбонатной седиментации был дефицит ОВ в карбонатном осадке. Лишь в анаэробных обста-



новках, в которых формировались карбонатные осадки с повышенным содержанием $C_{орг}$ (будущие черные сланцы), фосфор мог концентрироваться в вышекларковых количествах — даже в чистых карбонатных породах.

4. Однако в большинстве случаев повышение содержания фосфора наблюдается не в чистых, а в смешанных карбонатно-силикатных породах, что было отмечено еще Ф. Кларком в 1924 г. и В. А. Зильберминцем и В. П. Масловым в 1928 г.

5. Исследование корреляций фосфора часто выявляет позитивную корреляцию P_2O_5 с Al_2O_3 и TiO_2 , а негативную — с CaO и особенно с MgO . Это указывает на концентрацию фосфора в некарбонатных компонентах пород — обычно глинистых, реже алевритовых, при разбавляющей роли карбонатной матрицы. Лишь в условиях лавинной седиментации (как в орогенных молассах) ОВ карбонатных осадков могло предохраняться глинистыми покрывками от быстрого окисления, что обеспечивало лучшую сохранность первично-биогенного $P_{био}$ в карбонатном осадке.

6. Таким образом, наше исследование позволяет дополнить вывод А. Б. Ронова: главными носителями кларкового фосфора в карбонатных породах является не только остаточное ОВ, но, по-видимому, также и силикатно-сорбированный фосфор в глинистом веществе. Реже можно допускать участие и гидроксидно-сорбированного фосфора, хотя доля такого фосфора обычно также позитивно коррелируется с количеством силикатной примеси в карбонатной породе. Иногда, впрочем, наблюдалась и обратная картина — позитивная корреляция модуля ФЖМ с карбонатностью.

7. Метакарбонаты несколько богаче фосфором неметаморфизованных карбонатов — возможно, вследствие повышенного содержания фосфора в морях докембрия.

Литература

1. Анфимов Л. В. Литогенез в рифейских осадочных толщах Башкирского мегантиклинория (Южный Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 289 с.
2. Астахов А. С. Литохимия осадков материковой окраины востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2001. 240 с.
3. Батури Г. Н. Фосфатонакопление в океане. М.: Наука, 2004. 464 с.
4. Батури Г. Н. Фосфориты на дне океанов. М.: Наука, 1978. 232 с.
5. Блисковский В. З., Минеев Д. А. Камни плодородия. М.: Недра, 1986. 213 с.
6. Волохин Ю. Г. Мезозойское и кайнозойское кремненакопление в окраинных бассейнах востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2013. 434 с.
7. Зильберминц В. А., Маслов В. П. К литологии каменноугольных известняков Донецкого бассейна. М.: Гос. науч.-техн. изд-во Упр. ВСНХ, 1928. 215 с. (Тр. Института прикладной минералогии и металлургии. Вып. 35).
8. Мурдмаа И. О. Фации океанов. М.: Наука, 1987. 303 с.
9. Остроумов Э. А., Волков И. И. К вопросу о взаимосвязи фосфора, ванадия и органического вещества в отложениях Черного моря // Геохимия. 1957. № 6. С. 518–528.
10. Половко Н. И., Сироштан Р. И., Бондарева Н. М. и др. Карбонатные породы Украинского щита. Киев: Наукова думка, 1975. 152 с.

11. Ронов А. Б., Корзина Г. А. Фосфор в осадочных породах // Геохимия. 1960. № 8. С. 667–687.

12. Савенко А. В. Экспериментальное моделирование осаждения фосфора с карбонатом кальция при диагенезе морских осадков // Геохимия. 1998. № 7. С. 741–743.

13. Севастьянова Е. С., Свальнов В. Н. Содержание фосфора в глубоководных осадках восточной части Индийского океана // Океанология. 1978. Т. XVIII. Вып. 6. С. 1042–1048.

14. Систематика и классификация осадочных пород и их аналогов / В. Н. Шванов, В. Т. Фролов, Э. И. Сергеева и др. СПб.: Недра, 1998. 352 с.

15. Урасина Л. П., Другалева Т. А., Смолин П. П. Главнейшие магнетитовые месторождения. М.: Наука, 1993. 157 с.

16. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимия марганца. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. 540 с.

17. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Как называть карбонат-содержащую породу? (Из опыта практической работы) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 3 (255). С. 33–36.

18. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: Наука, 1994. 304 с.

19. Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Рыбина Н. В. Геохимия титана. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 436 с.

20. Юдович Я. Э., Кетрис М., Рыбина Н. В. Геохимия фосфора. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2020. 512 с.

21. Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Терешко В. В., Рыбина Н. В. Очерки литохимии Тимано-Уральского региона. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. 236 с.

22. Юдович Я. Э., Юдин В. В., Шулепова А. Н., Хорошилова Л. А. Новые данные об оолитовых железных рудах в среднем ордовике Северного Урала // Литология и условия образования докембрийских и палеозойских отложений Урала. Свердловск: УФАН СССР, 1981. С. 26–34.

23. Chambers J. M., Cleveland W. S., Kleiner B., Tukey P. A. Comparing Data Distributions // Graphical Methods for Data Analysis, 62. Belmont, California: Wadsworth International Group; 1983.

24. Clarke F. W. Data of Geochemistry. 5 ed. Washington, 1924. 518 pp. (U.S. Geol. Surv. Bull. 570).

25. Migdisov A. A., Gradusov V. P., Bredanova N. V. et al. Major and minor elements in hydrothermal and pelagic sediments of the Galapagos Mounds area, leg 70, Deep Sea Drilling Project // Init. Rep. DSDP. 1983. Vol. LXX. P. 277–295.

References

1. Anfimov L. V. *Litogenez v rifejskih osadochnyh tolshchah Bashkirkogo megantiklinoriya (Yuzhnyy Ural)* (Lithogenesis in the Riphean Sedimentary Strata of the Bashkir Meganticlinorium (Southern Urals)). Ekaterinburg: UB RAS, 1997, 289 p.
2. Astahov A. S. *Litohimiya osadkov materikovo okrainy vostoka Azii* (Lithochemistry of the Sediments in the Continental Margin of the East Asia). Vladivostok: Dal'nauka, 2001, 240 p.
3. Baturin G. N. *Fosfatonakoplenie v okeane* (Phosphates Accumulation in the Ocean). Moscow: Nauka, 2004, 464 p.
4. Baturin G. N. *Fosfority na dne okeanov* (Phosphorites on the Oceans Bottom). Moscow: Nauka, 1978, 232 p.
5. Bliskovskij V. Z., Mineev D. A. *Kamni plodorodiya* (Stones of Fertility). Moscow: Nedra, 1986, 213 p.
6. Volohin Yu. G. *Mezozojское i kajnozojское kremnenakoplenie v okrainnyh bassejnah vostoka Azii* (Mesozoic and Cenozoic Silica Accumulation in the Marginal Basins of the East Asia). Vladivostok: Dal'nauka, 2013, 434 p.



7. Zil'bermine V. A., Maslov V. P. *K litologii kamennougol'nykh izvestnyakov Doneckogo bassejna* (On the Lithology of Carboniferous Limestones of the Donetsk Basin). M.: Gos. nauch.-tekhn. izd-vo Upr. VSNH, 1928, 215 p. (Tr. In-ta prikladnoj mineralogii i metallurgii. V. 35).
8. Murdmaa I. O. *Facii okeanov* (Facies of the Oceans). Moscow: Nauka, 1987, 303 p.
9. Ostroumov E. A., Volkov I. I. *K voprosu o vzaimosvyazi fosfora, vanadiya i organicheskogo veshchestva v otlozheniyah Chernogo Morya* (On the relationship of phosphorus, vanadium and organic matter in the black Sea sediments). *Geohimiya*, 1957, No. 6, pp. 518–528.
10. Polovko N. I., Sirostian R. I., Bondareva N. M. et al. *Karbonatnye porody Ukrainskogo shchita* (Carbonate rocks of the Ukrainian shield). Kiev: Naukova dumka, 1975, 152 p.
11. Ronov A. B., Korzina G. A. *Fosfor v osadochnykh porodah* (Phosphorus in sedimentary rocks). *Geohimiya*, 1960, No. 8, pp. 667–687.
12. Savenko A. V. *Ekspperimental'noe modelirovanie soosazhdeniya fosfora s karbonatom kal'ciya pri diagenese morskikh osadkov* (Experimental modeling of co-deposition of phosphorus with calcium carbonate during diagenesis of marine sediments). *Geohimiya*, 1998, No. 7, pp. 741–743.
13. Sevast'yanova E. S., Sval'nov V. N. *Soderzhanie fosfora v glubokovodnykh osadkach vostochnoj chasti Indijskogo okeana* (Phosphorus content in deep-sea sediments of the Eastern Indian ocean). *Okeanologiya*, 1978, V. XVIII, No. 6, pp. 1042–1048.
14. *Sistematika i klassifikatsiya osadochnykh porod i ih analogov* / V. N. Shvanov, V. T. Frolov, E. I. Sergeeva et al. (Systematics and Classification of Sedimentary Rocks and their Analogues / V. N. Shvanov, V. T. Frolov, E. I. Sergeeva et al.). St. Petersburg: Nedra, 1998, 352 p.
15. Urasina L. P., Drugaleva T. A., Smolin P. P. *Glavnejshie magnazitovye mestorozhdeniya* (Major magnesite deposits). Moscow: Nauka, 1993, 157 p.
16. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Geohimiya marganca* (Geochemistry of Manganese). Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2014, 540 p.
17. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Kak nazyvat' karbonatsoderzhashchuyu porodu? (Iz opyta prakticheskoy raboty)* (What is the name of a carbonate-containing rock?). *Vestnik of Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 2016, No. 3 (255), pp. 33–36.
18. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Elementy-primesi v chernykh slancah*. (Trace Elements in Black Shales). Ekaterinburg: UIF Nauka, 1994, 304 p.
19. Yudovich Ya. E., Ketris M. P., Rybina N. V. *Geohimiya titan* (Geochemistry of Titanium). Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2018, 436 p.
20. Yudovich Ya. E., Ketris M. P., Rybina N. V. *Geohimiya fosfora* (Geochemistry of Phosphorus). Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2020, 512 p.
21. Yudovich Ya. E., Ketris M. P., Tereshko V. V., Rybina N. V. *Ocherki litohimii Timano-Ural'skogo regiona*. (Essays on Lithochemistry of the Timan-Ural Region). Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2016, 236 p.
22. Yudovich Ya. E., Yudin V. V., Shulepova A. N., Horoshilova L. A. *Novye dannye ob oolitovykh zheleznykh rudakh v srednem ordovike Severnogo Urala. Litologiya i usloviya obrazovaniya dokembrijskikh i paleozojskikh otlozhenij Urala* (New data on oolitic iron ores in the middle Ordovician of the Northern Urals). Sverdlovsk: UFAN SSSR, 1981, pp. 26–34.
23. Chambers J. M., Cleveland W. S., Kleiner B., Tukey P. A. *Comparing Data Distributions. Graphical Methods for Data Analysis*, 62. Belmont, California: Wadsworth International Group; 1983.
24. Clarke F.W. *Data of Geochemistry*. 5 ed. Washington, 1924, 518 pp. (U.S. Geol. Surv. Bull. 570).
25. Migdisov A.A., Gradusov V.P., Bredanova N.V. et al. *Major and minor elements in hydrothermal and pelagic sediments of the Galapagos Mounds area, leg 70, Deep Sea Drilling Project. Init. Rep. DSDP*, 1983, V. LXX, pp. 277–295.

Поступила в редакцию / Received 27.03.2020

BOROGYPSUM: MINERAL COMPOSITION, PROCESSING TECHNOLOGY

A. N. Khat'kova, L. G. Nikitina, S. A. Pateyuk, V. G. Cherkasov

Transbaikal State University, Chita

Alisa1965.65@mail.ru, nikitina-lg@mail.ru, nesvvik@gmail.com, cherkasov1948@yandex.ru

We have chosen borogypsum for our study, which contains gypsum and silicon dioxide used in various industries. Present methods of borogypsum processing were considered. A new flotation reagent was proposed to separate the silicon concentrate from boric acid production waste. With the help of methods of mathematical planning, a multifactor experiment was carried out to reveal the optimal mode of flotation. We chose the following factors: temperature, pH, concentration of the main flotation reagent, agitation time, and also the time of flotation. The results of an experimental study of the raw material and obtained samples were presented with the help of modern physicochemical methods (spectrophotometry, IR spectroscopy, scanning electron microscopy, X-ray phase analysis), which allowed studying the chemical and mineral compositions and the structure of the samples. The new flotation concentration technology from boric acid wastes was developed.

Keywords: waste, secondary raw materials, borogypsum, silicon dioxide, gypsum, perlthane ON-60, flotation, flotation reagent, multifactor experiment.

БОРОГИПС: МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ, ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ

А. Н. Хатькова, Л. Г. Никитина, С. А. Патеюк, В. Г. Черкасов

Забайкальский государственный университет, Чита

В качестве объекта исследования выбран борогипс, содержащий в своем составе гипс и диоксид кремния, которые могут быть использованы в различных отраслях промышленности. Рассмотрены существующие способы переработки борогипса. Предложен новый флотационный реагент, для выделения кремниевых концентратов из отходов производства борной кислоты. С помощью методов математического планирования проведен многофакторный эксперимент, который позволил выявить оптимальный режим проведения флотации. Представлены результаты экспериментального исследования исходного сырья, а также полученных образцов, с помощью современных аналитических методов (спектрофотометрия, ИК-спектроскопия, растровая электронная микроскопия, рентгенографический фазовый анализ). Разработана новая технология флотационного обогащения отходов производства борной кислоты.

Ключевые слова: отходы, вторичное сырье, борогипс, диоксид кремния, гипс, перластан ON-60, флотация, флотационный реагент, многофакторный эксперимент.

Introduction

In many countries, most of the industrial wastes are not processed, but simply stored in certain areas [5, 8]. The weakness of the Russian industry is a high resource intensity [17]. The rates of wastes generation are significantly ahead of their processing and natural deactivation [2, 6, 15]. Therefore, the wastes dumping and processing should be approached very carefully to minimize contamination of the environment [2, 7, 9, 10]. It is necessary to introduce new effective methods of waste disposal, which will entail measurable economic and environmental consequences [3, 16].

The Russian Far East possesses high reserves of unique mineral raw materials, but present processing technologies do not allow using them efficiently. Over the years of operation of mining and chemical industries in the Far East, millions of tons of technogenic wastes have been accumulated, which are not being processed at present. Thus, the total amount of boric acid waste products — borogypsum — in the Far East region is more than 25 million tons. Raw recycling is an alternative method of production of gypsum and silica-containing products.

Borogypsum includes a well-floated component — gypsum [1, 4]. The processing plant of Dalnegorsky mining-pro-

cessing complex already has all the necessary equipment for flotation. Some flotation machines are not used and may be involved in other processes. Gypsum, released into a foam product, is used for production of gypsum binder, and the silicon concentrate, remaining in the chamber, is used for the production of «white soot». Thus, flotation seems to be the most suitable method of gypsum processing.

To subsequently convert silicon concentrate into «white soot», which meets the technical specifications GOST 18307-78 [11], it is necessary to provide silicon dioxide content from 50 to 65 %, with output 15 % and higher, using flotation. In this case, gypsum concentrate, as a dump product, must comply with the technical conditions GOST 4013-82 [12].

The aim of this work is to identify the material composition of borogypsum and to develop a new technology of enrichment of waste products of boric acid production, providing valuable commodity concentrates (gypsum and silicon).

Objects and research methods

A sample of wastes from the production of boric acid — borogypsum — from Dalnegorsky mining and processing complex was chosen as the object of study.

For citation: Khat'kova A. N., Nikitina L. G., Pateyuk S. A., Cherkasov V. G. Borogypsum: mineral composition, processing technology. Vestnik of Geosciences, 2020, 3(303), pp. 22—27. DOI: 10.19110/geov.2020.3.3.

Для цитирования: Хатькова А. Н., Никитина Л. Г., Патеюк С. А., Черкасов В. Г. Борогипс: минеральный состав, технологии переработки // Вестник геонаук. 2020. 3(303). С. 22—27. DOI: 10.19110/geov.2020.3.3.



For flotation separation of silicon concentrate from borogypsum, we proposed *perlstan ON 60* flotation reagent, which was proven during flotation of nonmetallic fluorite ores [13, 20].

Perlstan — a trade name for anion-active surface substances of N-acyl-sarcosine group [18]. Perlstan ON 60 is one of several modifications available. Its chemical composition — sodium oleylsarcosinate $C_{17}H_{33}CON(CH_3)CH_2COONa$. At room temperature it looks like a yellow viscous liquid.

Perlstars are chemically and by reactivity similar to fatty acid flotation reagents. Acid perlstars dissolve in most organic solvents, for example, alcohols, glycols, ethers. Perlstan ON-60 is soluble in water. Perlstars are not sensitive to electrolyte solutions and hard water, their good foaming and wetting properties are their important features. Perlstars are resistant to oxidation by such strong oxidizing agents as hypochlorite, hydrogen peroxide and benzoyl peroxide. Perlstan salts have interesting properties due to the hydrophobic tail of the molecule. In water perlstars are many times less toxic than other anionic surfactants. A mild physiological effect and non-toxicity result in the widespread application of perlstars in such areas as cosmetics, perfumes and household chemicals.

The samples were studied by the photometric method using KFK-3-1 ZOMZ instrument for the content of silicon dioxide.

IR spectra were recorded by SHIMADZU FTIR-8400S infrared Fourier spectrometer in the region of $4000-400\text{ cm}^{-1}$ on KBr tablets.

The morphology and chemical composition of the samples were examined by scanning electron microscope (SEM) JSM-6510LV JEOL (Japan), with microanalysis system — energy disperse X-ray spectrometer INCA Energy 350, Oxford Instruments (United Kingdom) at 500X and 1000X. The samples were prepared by applying a powdered sample on a double-sided electrically conductive carbon with subsequent spraying a platinum film on the base.

The X-ray phase analysis was used to determine the mineral composition. The samples were grinded in agate pounder with alcohol and studied by powder diffraction method using X-ray diffractometer DRON-3.0, radiation — $CuK\alpha$, Ni — filter, $V=25\text{ kV}$, $I=20\text{ mA}$, in the range $5-65^\circ 2\theta$, scan step — 0.05° . Diffraction patterns were deciphered by the phase search software (DiffracPlus, PDF-2, 2007).

To determine optimal conditions of flotation, we used the method of rational planning of multifactor experiment [14] based on the non-linear multiple correlation and also the well-known formula by M. M. Protodyakonov proposed to process statistics. A new form of the equation with limitations by the theoretical maximum, shows its applicability for the description of kinetic dependences. Statistical criteria are used, which allow evaluating partial and master dependencies. The method recommended accelerated methods of algebraic description of partial dependencies.

Table 1. Levels of the studied factors

Таблица 1. Уровни изучаемых факторов

Factor / Фактор	Levels / Уровни				
	1	2	3	4	5
X_1 — Flotation temperature, $^\circ\text{C}$ / X_1 — Температура флотации, $^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30
X_2 — Flotation pH / X_2 — pH флотации	5.5	6.5	7.5	8.5	9.0
X_3 — Perlstan consumption ON-60, g/t / X_3 — Расход перластана ON-60, г/т	200	250	300	350	400
X_4 — Agitation time, s / X_4 — Время агитации, с	60	90	120	150	180
X_5 — Flotation time, min / X_5 — Время флотации, мин	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0

Table 2. Results of reverse flotation of amorphous silica under optimal conditions of a multifactor experiment

Таблица 2. Результаты обратной флотации аморфного кремнезема в оптимальных условиях многофакторного эксперимента

Flotation Mode / Режим флотации		Results / Результаты	
Parameter / Параметр	Value / Значение	Parameter / Параметр	Value / Значение
Temperature, $^\circ\text{C}$ / Температура, $^\circ\text{C}$	30	SiO_2 yield in chamber product, %	36.77
pH	7.91	Выход SiO_2 в камерный продукт, %	
C bas. flotation, g/t / C осн. флотации, г/т	400	SiO_2 content in chamber product, %	46.27
C control flotation, g/t / C контр. флотации, г/т	200	Содержание SiO_2 в камерном продукте, %	
Agitation time, s / Время агитации, с	180		
Time of main flotation, min / Время осн. флотации, мин	4.5	SiO_2 extraction in chamber product, %	65.15
Time of control flotation, min / Время контр. флотации, мин	4.5	Извлечение SiO_2 в камерный продукт, %	

Table 3. SEM results of the obtained products

Таблица 3. Результаты РЭМ полученных продуктов

Product / Продукт	Si, %	S, %	Ca, %	O, %	Other elements, % / Другие элементы, %
Original / Исходный	12.72	9.63	13.53	61.23	2.89
Foamy No. 1 / Пенный № 1	9.13	13.55	19.26	56.25	1.81
Foamy No. 2 / Пенный № 2	4.61	13.18	22.04	58.49	1.68
Chamber / Камерный	18.12	7.78	11.90	56.80	5.40

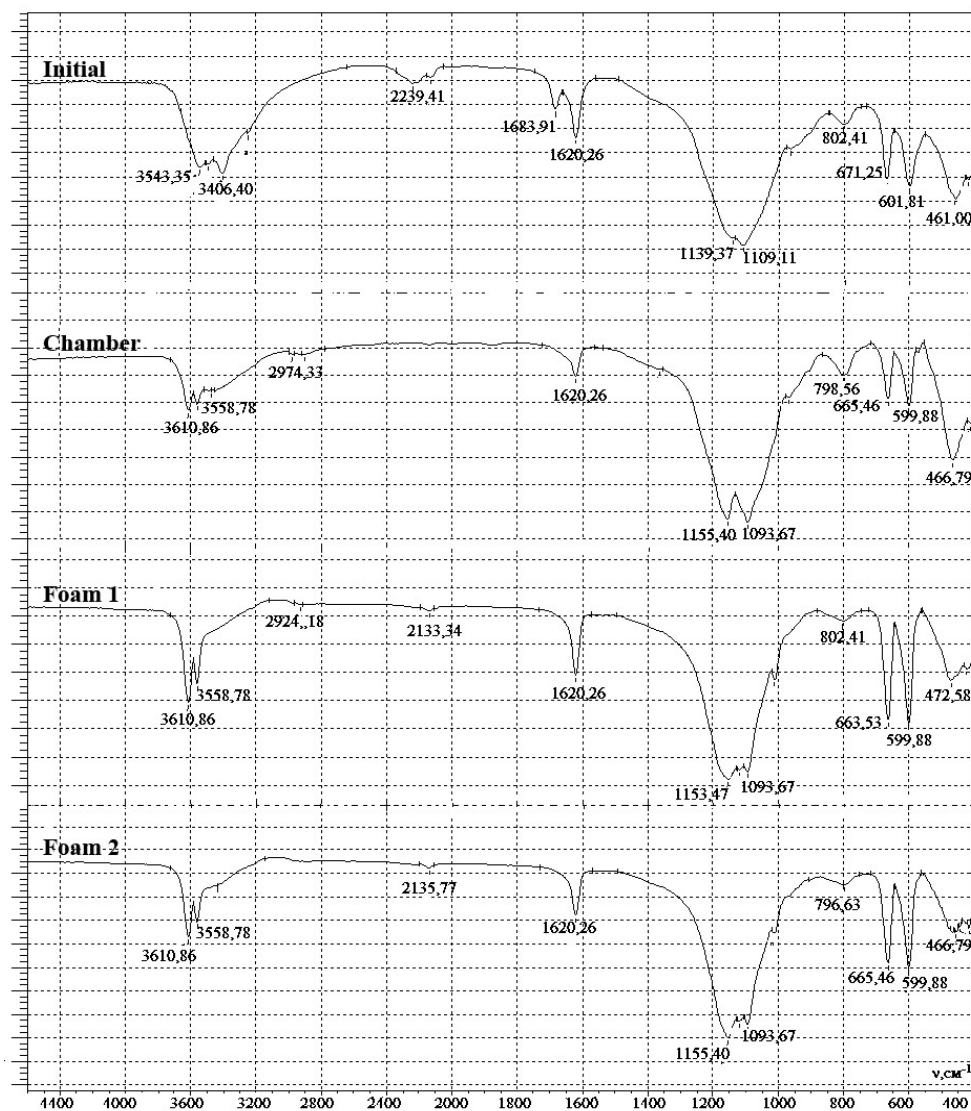


Fig. 1. IR spectra of studied samples

Рис. 1. ИК-спектры исследуемых образцов

Results and discussion

During the multifactor experiment (Table 1) we determined an optimal flotation mode. Table 2 presents results of reverse flotation of amorphous silica in optimal conditions of the multifactor experiment.

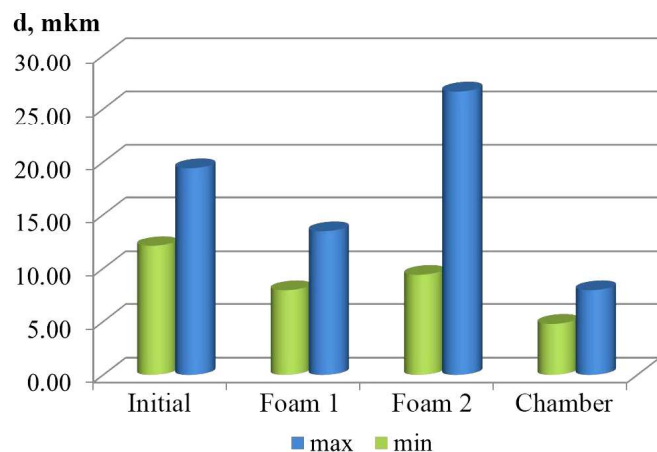


Fig. 2. Minimum and maximum diameter of the enzyme of particle aggregates in SEM micrographs

Рис. 2. Минимальный и максимальный диаметр Ферета агрегатов частиц на микрофотографиях РЭМ

IR spectroscopy. In the IR spectra (Fig. 1), stretching vibrations of Si-O-Si groups (regions 1094 cm^{-1} , 466 cm^{-1}) refer to the content of silicon dioxide, and vibrations of SO_4 groups (regions 1153 cm^{-1} , 665 cm^{-1} , 600 cm^{-1}) — to the content of gypsum and anhydride in the samples. The change in the relative intensity of the absorption bands belonging to stretching vibrations of silicon dioxide and gypsum was measured with respect to the intensity of the absorption band belonging to stretching vibrations of Si-O-Si groups in the region 1094 cm^{-1} [19]. The relative intensity of the absorption bands of the stretching vibrations of SO_4 groups increases

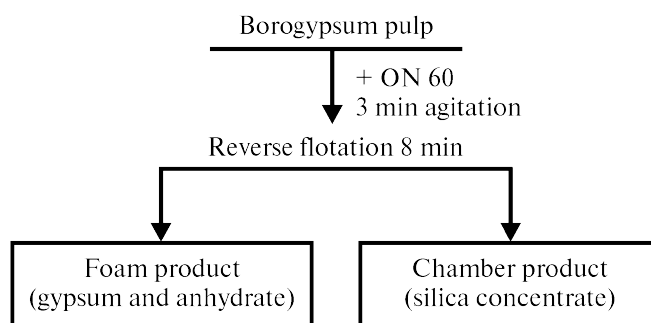


Fig. 3. Flotation scheme of borogypsum

Рис. 3. Схема флотации борогипса



Table 4. The chemical composition of the studied products

Таблица 4. Химический состав исследуемых продуктов

Indicator / Показатель	Designation Обозначение	Content wt. % / Содержание, масс. доля, %			
		Product / Продукт			
		Original Исходный	Chamber Камерный	Foamy No. 1 Пенный № 1	Foamy No. 2 Пенный № 2
Silicon (oxide) / Кремний (оксид)	SiO ₂	23.12	45.27	11.90	15.69
Calcium (oxide) / Кальций (оксид)	CaO	25.20	19.57	31.76	31.70
Sulfur (oxide) / Сера (оксид)	SO ₃ общ.	31.53	18.59	45.71	41.14
Boron (oxide) / Бор (оксид)	B ₂ O ₃	1.06	1.46	0.67	0.88
Iron (oxide) / Железо (оксид)	Fe ₂ O ₃ общ.	3.08	5.21	1.83	3.49
Aluminum (oxide) / Алюминий (оксид)	Al ₂ O ₃	0.65	1.07	0.31	0.56
Magnesium (oxide) / Магний (оксид)	MgO	0.28	0.60	0.14	0.17
Manganese (oxide) / Марганец (оксид)	MnO	0.25	0.49	0.12	0.18
Sodium (oxide) / Натрий (оксид)	Na ₂ O	0.23	0.33	0.19	0.18
Potassium (oxide) / Калий (оксид)	K ₂ O	0.090	0.15	0.040	0.060
Titanium (oxide) / Титан (оксид)	TiO ₂	0.040	0.080	0.020	0.030
Hygrosopic water / Вода гигроскопическая	H ₂ O ⁺	13.79	6.16	6.62	5.48

Table 5. Mineralogical composition of the samples

Таблица 5. Минеральный состав исследуемых образцов

Mineral / Минерал	Theoretical formula Теоретическая формула	Mass fraction, % / Массовая доля, %			
		Product / Продукт			
		Original Исходный	Chamber Камерный	Foamy No. 1 Пенный № 1	Foamy No. 2 Пенный № 2
Gypsum / Гипс	CaSO ₄ ×2H ₂ O	48	28	63	50
Anhydrite / Ангидрит	CaSO ₄	16	8.5	17	24
Quartz / Кварц	SiO ₂	2	4	1	1
Hedenbergite / Геденбергит	CaFeSi ₂ O ₆	1	6	—	—
Wollastonite / Волластонит	CaSiO ₃	4	6	—	—
Garnet / Гранат	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₂ (OH) ₄	3	4	1	3
Sum of the crystalline phases / Сумма кристаллических фаз		74	56.5	82	78
Amorphous silica dioxide / Аморфный диоксид кремния		22.12	41.27	10.90	14.69
Undecomposed minerals / Аморфный диоксид кремния		3.88	2.23	7.1	7.31

Table 6. Comparative characteristics

Таблица 6. Сравнительная характеристика

Characteristic Показатель	Scheme proposed by Dalnegorsky Processing plant Схема ООО «Дальнегорский ГОК»	Our scheme Разработанная нами схема
Flotation reagent Флотационный реагент	Liquid soap Жидкое мыло	Perlstan Перластан ON-60
Reagent consumption g/t of borogypsum sludge Расход реагента, г/т шламов борогипса	1500	1000
Medium regulator Регулятор среды	Soda Сода	Not required Не требуется
Consumption of a medium regulator, kg/t of borogypsum sludge Расход регулятора среды, кг/т шламов борогипса	7–10	—
Temperature, °C Температура, °C	40	30
pH	8.5–9.0	7.5
Time of main flotation, min Время основной флотации, мин	9	8
Control flotation time Время контрольной флотации	5	нет
Extraction of SiO ₂ , % Извлечение SiO ₂ , %	33.57	64.02
Output of SiO ₂ , % Выход SiO ₂ , %	15.11	32.50
SiO ₂ yield, % Содержание SiO ₂ , %	60.24	53.56



Table 7. Technical and economic indicators
Таблица 7. Технико-экономические показатели

Indicators Показатели	Unit Ед.изм.	Scheme by Dalnegorsky processing plant Схема ООО «Дальнегорский ГОК»	Proposed scheme with perlstan ON-60 Предлагаемая схема с перластаном ON-60	Scheme with liquid soap Схема с жидким мылом
Raw production capacity Производственная мощность по сырью	t/year т/год	388729.44	388729.44	
Products: Boric Acid / Продукция: борная кислота				
Production program Продукция: борная кислота	t/year т/год	32746.48	32746.48	32746.48
Unit price rub. Цена единицы продукции	rub. руб.	40000	40000	40000
Cost of production units rub. Себестоимость единицы продукции	rub. руб.	33199	33199	33199
Products: Silicon Concentrate / Продукция: кремниевый концентрат				
Production program Производственная программа	t/year т/год	—	19836.81	9131.23
Unit price rub. Цена единицы продукции	rub. руб.	—	10000	10000
Cost of production units rub. Себестоимость единицы продукции	rub. руб.	—	8300	8109
Products: Gypsum Concentrate / Продукция: гипсовый концентрат				
Production program Производственная программа	t/year т/год	—	41247.97	51953.55
Unit price rub. Цена единицы продукции	rub. руб.	—	3500	3500
Cost of production units rub. Себестоимость единицы продукции	rub. руб.	—	2905	2838
Number of personnel Численность ППП	people чел.	175	183	198
Total cost Полная себестоимость	mln. rub. млн руб.	1042.15	1315.68	1310.37
Commodity production Товарная продукция	mln. rub. млн руб.	1309.86	1652.60	1583.01
Net profit Прибыль чистая	mln. rub. млн руб.	214.17	269.53	218.11

es as a result of flotation, which indicates the transition of gypsum into foam products. In turn, the increase in the relative intensity of the absorption bands of Si-O-Si groups in the chamber product indicates the increase in the concentration of silicon dioxide.

Scanning electron microscopy. The samples have a complicated microsurface relief; fine material is formed by crystals and aggregates. Minimum and maximum Feret diameter is presented in Fig. 2. The chemical composition of the samples is given in Table 3. The greater part of Ca and S after flotation passed into foam products, taking a minor amount of Si. This allows significantly increasing Si content in the chamber product.

Based on SEM images, it can be noted that the chamber product has a more finely dispersed structure (Fig. 2). The flotation results in aggregation of particles as evidenced by increasing maximum Feret diameter of the particles in foam product No. 2, in comparison with the original sample.

Comparative studies of chemical and mineral composition of initial product and the samples obtained are shown in Table 4 and Table 5 respectively. We determined that the

content of silicon dioxide after flotation significantly increases in the chamber product and decreases in the foam product, and the content of sulfur and calcium increases on the contrary.

Experiments showed that the fractional reagent feed is not effective, it is necessary to increase Perlstan flow only in primary flotation. We determined the most efficient flotation mode of borogypsum with collecting reagent ON-60.

Analyzing the obtained data, the authors proposed the most effective mode of flotation of borogypsum with collecting reagent perlstan ON-60 according to the scheme in Fig. 3, with the following flotation parameters: *temperature — 30°C; pH 7.5; perlstan ON-60 consumption — 1000 g/t; agitation time — 180 s; main flotation time, min — 8.* This technological scheme allows obtaining a high-quality product with a silicon dioxide content 53.56 %, at a high silicon dioxide recovery 64.02 %. Comparing the scheme offered at Dalnegorsky processing plant, with the scheme developed by the authors, the latter has a number of advantages (Table 6).

Table 7 presents the feasibility study [20] of the work performed. The proposed scheme of boric acid production



recycling increases net profit of enterprises to 55.36 mln rub. This is resulted from addition of two commodity concentrates — silicon and gypsum. Despite increasing costs of fixed and current assets, the income from the production of additional concentrates exceeds these costs. The proposed scheme for the processing of wastes using Perlstan ON-60 collecting reagent is more efficient than the liquid soap scheme, since the latter entails additional costs for equipment, personnel and consumables. The environmental effect of the introduction of this technology into production is also important. Because of the wastes processing, not only the cost of waste storage is reduced by 1.77 million rubles, but also the environmental situation in the region is significantly improved, both due to a significant reduction in the intensity of waste accumulation and the release of land from stored wastes.

Conclusions

The work has solved an urgent scientific and technical problem of increasing technical and economic indicators of flotation of waste products of boric acid production based on the development of new reagent modes using perlstan ON-60 collecting reagent, which is selective for minerals of borogypsum.

On the basis of the studies we made the following conclusions:

1. Technological features of the datolithic ores waste processing parameters are determined by the content of main minerals (gypsum, anhydrite, amorphous silica), which predetermine use of flotation methods for the enrichment of industrial raw.

2. It was confirmed that perlstan ON-60 collecting reagent is an effective reagent for separation of borogypsum minerals. Extraction of silicon dioxide, when it is applied, increases by 30.45 % compared with the known mode.

3. We developed a new technology for redistribution of waste products of boric acid production, which allowed producing two types of commercial concentrates (gypsum and silicon), as well as reducing rate of waste formation, which could result in a significant improvement of the ecological situation in the areas of waste burial.

References

1. Bulut G., Atak S., Tuncer E. Celestite-gypsum separation by flotation. The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science, 2008, issue 2, vol. 47, pp. 119–126.
2. European commission, available at: <http://ec.europa.eu/environment/waste/mining/index.htm>, 2019.
3. Kudelko J. Effectiveness of mineral waste management. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2018, No. 1–9, pp. 440–448 DOI: 1080/17480930.2018.1438036.
4. Matsuno T., Kadota M., Ishiguro Y. Separation of Gypsum by the Flotation Process. Bulletin of the Society of Salt Science, 1958, vol. 12, issue 2, pp. 73–78.
5. Negm A. M., N. Shareef N. Waste Management in MENA Regions — Switzerland: Springer, 2019, pp. 1–11.
6. Oelofse S. H. H., Hobbs P. J., Rascher J., Cobbing J. E. The pollution and destruction threat of gold mining waste on the Witwatersrand — A West Rand case study. 10th International symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP, 2007) (Bangkok, Thailand, 11–13 December 2007). Editorial board: Dr. Raj Singhal et. Mine Planning and Equipment Selection, USA, 2007, 973 p.

7. Ozhogina, E. G., Kotova, O. B. New methods of mineral processing and technology for the progress of sustainability in complex ore treatment (2019): Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (2–s2.0-85059377649), pp. 32–40.
8. Pullum L., V. Boger D. Sofra F. Hydraulic Mineral Waste Transport and Storage. Annual Review of Fluid Mechanics, 2018, vol. 50, pp. 157–185
9. Singhania, R. R., Agarwal, R. A., Kumar, R.P., Sukumaran, R.K. Waste to Wealth — Singapore: Springer, 2018, pp. 1–15.
10. Amadzieva N.A., Khizriev A.S. *Vozobnovliaemaia energetika kak odin iz faktorov energosberezheniia na sel'skikh territoriiakh respublik Dagestan* (Renewable energy as one of the factors of energy saving in the rural territories of the Republic of Dagestan). Regionalnye problemy preobrazovaniya ekonomiki. 2016, No. 2 (64), pp. 90–96.
11. GOST 18307-78. *Sazha belaya. Texnicheskie usloviya* (White soot. Technical conditions) 01.01.1979. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1998, 19 p.
12. GOST 4013-82. *Kamen gipsovyj i gipsoangidritovyj dlya proizvodstva vyazhushchikh materialov. Texnicheskie usloviya*. (Gypsum and anhydrite stone for production of binding materials). 27.09.1982, Moscow: Izdatelstvo standartov, 1987, 6 p.
13. Dolgikh O.L. *Ispolzovanie reagenta perlstana kak alternativy oleinovo kislote pri flotacii fluorida* (Use of perlstan reagent as an alternative to oleic acid during fluorite flotation). Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012, No. 9 (88), pp. 20–26.
14. Malyshev V.P. *Matematicheskoe planirovanie metallurgicheskogo i khimicheskogo eksperimenta* (Mathematical planning of metallurgical and chemical experiment). Alma-Ata: Nauka, 1977, 35 p.
15. Nikiforov I.V., Mustafin I.A., Gil'mutdinov A.T., Akhmetov A.F., Lapshin I.G. *Issledovanie kompozitsii kotel'nogo topliva na baze produktov pererabotki nefteshlama i ostatkov neftehimicheskikh proizvodstv* (Study of boiler fuel compositions based on sludge processing products and petrochemical residues). Bashkirskii khimicheskii zhurnal, 2016, No. 3, pp. 89–93.
16. Ozhogina E. G., Kotova O. B., Yakushina O. A. *Gornopromyshlennye otkhody: mineralogicheskie osobennosti* (Mining wastes: mineralogical features). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, 2018, No. 6, pp. 43–49. (doi 10.19110/2221-1381-2018-6-43-49).
17. Sagdeeva G. S., Patrakova G. R. *Pererabotka othodov proizvodstva i potrebleniia s ispolzovaniem ikh resursnogo potentsiala* (Recycling of production and consumption waste using their resource potential). Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2014, No. 6, pp. 194–198.
18. Samatova L. A., Shepeta E. D. *Perspektivy primeneniya oleil-sarkozinatov v sobiratel'nykh smesnykh pri flotacii bednykh sheelitovykh rud. Sovremennye metody tekhnologicheskoi mineralogii v processakh kompleksnoi i glubokoi pererabotki mineral'nogo syr'ya* (Prospects for the use of oleyl sarcosinates in collective mixtures for flotation of poor scheelite ores. In: Modern methods of technological mineralogy in the processes of complex and deep processing of mineral raw materials). Proceedings of Plaksin Readings 2012, Petrozavodsk: Karelia SC RAS, 2012, 391 p.
19. Fatyanov A. V., Leonov S. B., Katashin L. V. *Sostoyaniye obogashcheniya flyuoritovykh rud* (Conditions of processing fluorite ores). A.V. Fatyanov, S.B. Leonov, L.V. Katashin, Moscow: Cvetmetanformatsiya, 1972, 65 p.
20. Sapozhnikov S. Yu. *Metodicheskie ukazaniya* (Methodical instructions). Chita: Chita State University, 2003, 42 p.



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549 (929)

DOI: 10.19110/geov.2020.3.4

ЭКСПЕДИЦИЯ БРАТЬЕВ КУЗНЕЦОВЫХ НА ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ

Ю. Л. Войтеховский

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Voytekhovskiy_YuL@pers.spmi.ru

Статья посвящена геологическим результатам комплексной экспедиции на Полярный Урал, спонсированной братьями Н. Г. и Г. Г. Кузнецовыми и организованной Императорской академией наук, Геологическим комитетом и Русским географическим обществом 22 мая — 9 сентября (по старому стилю) 1909 г., а также 140-летию со дня рождения начальника экспедиции выдающегося петрографа О. О. Баклунда. Экспедиция обнаружила широкое распространение метаморфических горных пород. Исторический интерес представляют использованные О. О. Баклундом руководящие идеи и методы реконструкции первичной (осадочной или магматической) природы. Кроме того, статья обращает внимание на проблему рациональной классификации горных пород, не решенную до сих пор.

Ключевые слова: Полярный Урал, экспедиция братьев Кузнецовых, метаморфические горные породы, петрологические реконструкции.

THE KUZNETSOV BROS.' EXPEDITION TO THE POLAR URALS

Yu. L. Voytekhovsky

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

The article is dedicated to the geological results of a comprehensive expedition to the Polar Urals, sponsored by brothers N. G. and G. G. Kuznetsov and organized by the Imperial Academy of Sciences, Geological Committee, and Russian Geographical Society from May 22 to September 9 (old style) of 1909, as well as to the 140th anniversary of the head of the expedition, the outstanding petrographer O. O. Backlund. The expedition faced the wide distribution of metamorphic rocks. The guiding ideas and methods of reconstructing their primary (sedimentary or magmatic) nature used by O. O. Backlund are of great historical interest. Besides, the article draws attention to the problem of rational classification of rocks, which has not been solved so far.

Keywords: the Polar Urals, Kuznetsov brothers' expedition, metamorphic rocks, petrologic reconstructions.

Введение

В 2019 г. исполнилось 110 лет экспедиции, организованной московскими купцами братьями Н. Г. и Г. Г. Кузнецовыми на Полярный Урал. Сделавшие состояние на торговле чаем и жившие большей частью в Париже, во время одного из приездов в Санкт-Петербург они предложили директору Геологического комитета академику Ф. Н. Чернышеву средства на полезное для науки дело. Академия наук, Геологический комитет и Русское географическое общество постановили организовать экспедицию на Полярный Урал и в Карскую тундру. Начальником экспедиции был рекомендован петрограф Геологического музея Академии наук О. О. Баклунд (1878—1958), еще студентом Санкт-Петербургского университета работавший на Шпицбергене под руководством Ф. Н. Чернышева (1899—1901), а после его окончания — в Хатангской экспедиции под руководством И. П. Толмачева (1904—1905). Братья Кузнецовы дошли в составе экспедиции до г. Манисей на северной оконечности Уральского хребта и вернулись в Обдорск (ныне Салехард). А экспедиция последовала далее и в це-

лом решила поставленные задачи. Отдадим должное и меценатам: профинансировав подготовку экспедиции, они затем позаботились о судьбе коллекций и издании отчета [1], сохранившегося в библиотеке Российского минералогического общества (рис. 1). Недавно он издан в репринтном варианте [2] и доступен в интернете. И все же потрепанные, пожелтевшие страницы, заломы уголков и пометки на полях лучше передают колорит экспедиции. Нас более всего интересуют ее геологические результаты.

О. О. Баклунд впоследствии охарактеризовал их довольно скромно. «Материал, привезенный из посещенных экспедицией мест, не дает полной картины строения края, т. к. произведенные геологические наблюдения далеко не полны. Но я все же решаюсь опубликовать главный материал, предоставляя строгой критике не самый материал, ибо он сам по себе не полный, но способы и методы его обработки и выведенные из наблюдений и материала заключения» [1, с. 1]. Кроме

*В цитатах сохранена авторская орфография и пунктуация.

Для цитирования: Войтеховский Ю. Л. Экспедиция братьев Кузнецовых на Полярный Урал // Вестник геонаук. 2020. 3(303). С. 28—32. DOI: 10.19110/geov.2020.3.4.

For citation: Voytekhovsky Yu. L. The Kuznetsov bros.' expedition to the Polar Urals. Vestnik of Geosciences, 2020, 3(303), pp. 28—32. DOI: 10.19110/geov.2020.3.4.

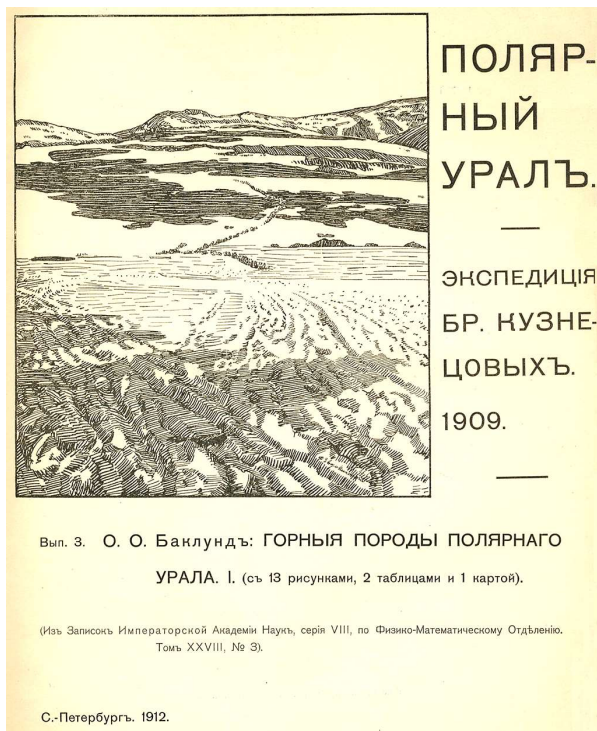


Рис. 1. Титульный лист отчета

Fig. 1. Cover page of the report

того, что «работы в поле значительно пострадали от особого стечения обстоятельств в начале пути экспедиции», помехой собственно геологическим исследованиям был ее комплексный характер. «Кому приходилось принимать участие в экспедиции, преследующей общегосударственно-исторические цели и, следовательно, состоящей из целого штата натуралистов по различным специальностям [геолог, топограф, зоолог, ботаник, агроном, этнограф, астроном], тот, может быть, имеет представление, на какие компромиссы должны соглашаться отдельные специалисты, чтобы не страдало общее дело экспедиции. Особенно же тяжело положение начальника экспедиции, когда он сам является также специалистом <...> и поэтому чаще всего компромисс идет в ущерб его специальной работы. Когда же экспедиция, по условиям местности и передвижения, не имеет возможности разделяться на отдельные партии, то этот компромисс является ежедневным занятием» [1, с. 1]. И все же эта экспедиция заслуживает быть упомянутой на страницах «Вестника геонаук» в память о предтечах, упорно осваивавших Полярный Урал.

Методы

За прошедшее столетие методы лабораторного изучения минералов и горных пород сильно изменились. Появились неразрушающие рентгеноструктурные методы и методы абсолютной геохронологии, существенно укрепившие методологию полевого картирования. О. О. Баклунд подробно обсуждает во «Введении» основные на тот момент методы — оптический и химический — с их нюансами. «Оптические определения полевых шпатов производились по способам, предложенным Беке (1906). При сравнении их показателей преломления с таковыми канадского балъзама <...> определения эти произведены на рефрактометре Abbe-Pulfrich и мало отличаются от полученных Schaller'ом

<...> При измерении угловых расстояний следов оптических осей в двойниках, полевошпатовых и других <...> применена почти исключительно рисовальная камера Abbe с вращающимся столиком Беке; для эталонировки прибора послужили препараты минералов с известными и измеренными на приборе Wülfing'a углами оптических осей. <...> Для других минералов <...> из таблиц Rosenbusch'a (1905) были взяты соответствующие показатели <...> поправка на нецентральное положение биссектрисы была введена по таблице Беке (1904). В тех сравнительно немногих случаях, когда было измерено двойное преломление при помощи компенсатора Babinet, были строго применены предписания Беке <...> При всех приведенных ниже в описании величинах двупреломления приведены также результаты измерения толщины <...> измеряемого сечения, чтобы показать, насколько ненадежны определения двупреломления по окраске, при известной толщине, по таблице Michel-Levy и Lacroix (1888). <...> Для части пород был применен метод приблизительной оценки количественных отношений минеральных компонентов при помощи окулярного микрометра. Этому давно известному методу посвящена часть недавно вышедшей работы Чирвинского (1910)» [1, с. 5–6] и т. д. и т. п. Аналогично для методов химического анализа. Многие формулировки уже мало что говорят современному специалисту — наука шагнула далеко вперед. Но отдадим должное тщательно продуманной методике исследования, что важно во все времена. Заметим, кроме того, что на момент написания отчета (1910–1911) О. О. Баклунд ссылается в основном на свежие научные публикации современников, ныне большей частью классиков.

Но еще раньше методов анализа вещества О. О. Баклунд обсуждает... вопросы терминологии, проявляющие проблемы методологии, подобно тому, как на поверхности реки проявляются ее глубинные течения и завихрения. Это нужно подчеркнуть, так как сегодня интерес к методологии упал, и вовсе не потому, что основные проблемы решены. «Материал, собранный экспедицией, почти целиком состоит из измененных последующими процессами метаморфизации изверженных и осадочных пород. <...> Большая часть, следовательно, представляет собой "кристаллические сланцы" в смысле Grubenmann'a (1910); но так как часть пород макроскопически, даже местами микроскопически, не обладает признаками, выраженными словом "сланцы", то в последующем изложении этот термин избегается, и вместо него употребляется термин "метаморфические породы" независимо от того, произошли ли они путем изменения осадков или изверженных пород. Но в то же время метаморфические породы или метаморфизм не следует понимать в широком смысле van Hise'a (1904); многое из того, что разбирается и описывается им, обычно принято называть выветриванием и другими процессами. <...>

Еще недавно Schwarz (1911) обратил внимание на то, что "метаморфические породы" нуждаются в точном определении. <...> Под метаморфическими породами ниже следует понимать породы, которые выведены из первичных условий физико-химического равновесия (места залегания и образования их) и которые с новыми условиями вступили в новое равновесие (курсив О. О. Баклунда. — Ю. В.). Это равновесие выражается перегруппировкой

и новой ассоциацией минералов, распадением старых и образованием вновь более стойких минеральных видов и группировок. Насколько произошло химическое изменение породы в количественном отношении — учесть трудно. <...> Под это определение не подходит выветривание, так как оно является процессом не установившегося равновесия; компоненты фаз уносятся беспрестанно, фазы постоянно меняются, и равновесие наступить не может. В то же время под это определение подходят региональный метаморфизм, по определению Milch'a (1894), температурные зоны Becke (1909), динамические зоны Grubenmann'a (1910), контактовый метаморфизм Weinschenk'a (1900) и др. Исследованиями в поле в каждом отдельном случае остается решить, какая именно форма метаморфизма, как действующее начало, имела место или же преобладала» [1, с. 3–5].

«В последующем изложении породы, для облегчения их обзора и разбора, разбиты на несколько большей частью естественных групп. Принципом деления пород на группы не служит какая-либо общая точка зрения. В общем деление это произведено на основании общих петрографических признаков, но в то же время эти группы соответствуют географическим областям. <...> Хотя классификация метаморфических пород, предложенная Grubenmann'ом (1910), во многих отношениях является искусственной, ибо не уделяет достаточно внимания генезису пород, но в то же время она является самой удобной и рациональной, так как она более или менее равномерно придерживается химико-минералогической точки зрения. По отношению пород, ведущих свое происхождение от мономинеральных, как осадочных, так и изверженных, она является более или менее генетической. По отношению же пород, происходящих из полиминеральных, то есть из обычных изверженных пород и смешанных осадков, считая в числе последних большинство глинистых отложений, задача классификации является гораздо более сложной. <...>

Что метаморфические породы управляют другими законами, чем породы огненножидкого (давно известный эмпиризм) и отчасти нормального контактметаморфического (в узком смысле слова) происхождения, видно из того, что в породах метаморфических встречаются минеральные комбинации, которые немыслимы в породах изверженных и, по видимому, судя по подробному теоретическому разбору Goldschmidt'a (1911), не совсем обычны или требуют особых условий образования в контакт-метаморфных. Большинство же намеченных условий для классификации метаморфических пород неизвестно или мало известно; поэтому в последующем изложении я пользовался классификацией Grubenmann'a как более детальной» [1, с. 11–12].

Обращает внимание двойственность в принципах классификации горных пород, сохранившаяся до сего дня. С одной стороны, классификация удобна и рациональна, если она «придерживается химико-минералогической точки зрения». С другой стороны, она искусственна, если «не уделяет достаточно внимания генезису пород». Лишь для горных пород, «ведущих свое происхождение от мономинеральных, как осадочных, так и изверженных», удобный и рациональный химико-минералогический подход одновременно является «более или менее генетическим» и, стало быть, естественным. Уместно напомнить, что по этому поводу в

то же время сказал А. Харкер. «Петрология до сих пор не выработала никакой философской классификации горных пород. (Это перекликается с приведенной выше фразой О. О. Баклунда: «Принципом деления пород на группы не служит какая-либо общая точка зрения». — Ю. В.) <...> На сегодня, следовательно, наилучшей систематикой является та, которая объединяет, насколько это возможно ради удобства описания, горные породы с общими свойствами, в первую очередь имея в виду те свойства, которые наиболее прямо зависят от важных генетических условий. Используемая ниже группировка должна рассматриваться скорее как одно из соглашений, чем как принцип» (пер. с англ. — Ю. В.) [6, с. 20]. При этом «ниже использована» и ныне принятая петрографическая классификация. Дискуссия о принципах рациональной классификации и через столетия остается на том же месте.

Что касается методов маршрутного геологического картирования, они у О. О. Баклунда вполне современны: отбор образцов всех (лучше больше, чем меньше) макро- и тем более микроскопически различимых (по модальному составу, структуре и текстуре) горных пород, прослеживание геологических границ по простиранию и вкрест*, оконтуривание геологических тел... О маршрутных геофизических методах речи еще не шло. Но отметим метод, к сожалению, постепенно уходящий из полевой геологической практики, — тщательные концептуальные зарисовки целых ландшафтов и отдельных обнажений, которые не заменяют даже высокоразрешающие фотографии сами по себе, без прорисовки важных геологических деталей (рис. 2, 3).

Результаты

Полевые дневники (тоже уходящая традиция) и написанные на их основе отчеты геологов (впрочем как и географов, биологов и прочих путешественников) той поры можно читать как повести, следя за профессиональной интригой и наслаждаясь богатым языком. «Уже в 8 верстах от берега Оби, среди тундры, были встречены коренные обнажения, сначала в виде россыпей *in situ*, похожих на "stone rivers", затем в виде настоящих обнажений диоритовой породы. Первые тянутся приблизительно с севера на юг в виде плоских, едва заметных гребней... <...> В общем, гребни как бы затонули в тундре. <...> Темно-серая плотная кварцевая порода, разбитая трещинами по всевозможным направлениям и поэтому распадающаяся при ударе молотком на неправильные остроугольные куски, с несвежим, покрытым налетом кальцита, изломом, образует как бы главную породу, которую в виде жил различной мощности просекает ряд изверженных пород; начиная с востока, наблюдаются: жила небольшой мощности аплитового гранодиорита; серая кварцевая порода, местами с заметной полосатостью, дающей ей сходство с породой, встреченной на 9-й версте; аплитовый гранодиорит; серая кварцевая порода; луговое пространство в 50 м отделяет это обнажение от следующего, в котором исключительно, в виде невысоких башен, господствует зеленая порода амфиболового характера, но сохранившая еще ясные следы жильного происхождения, как это видно на следующем обнажении к юго-востоку (на берегу ру-

*в крест простирания

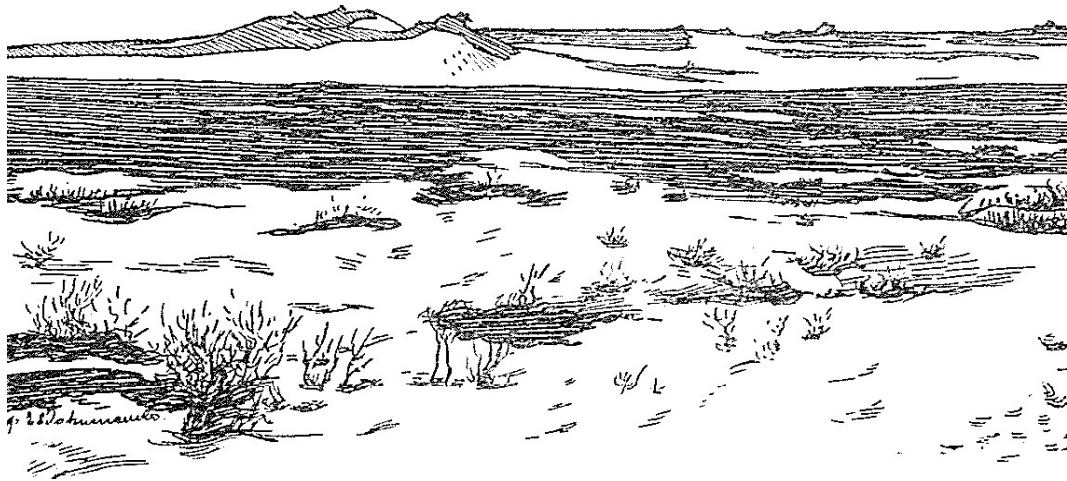


Рис. 2. Обнажение анортозита [1, рис. 2]

Fig. 2. Anorthosite outcrop [1, fig. 2]

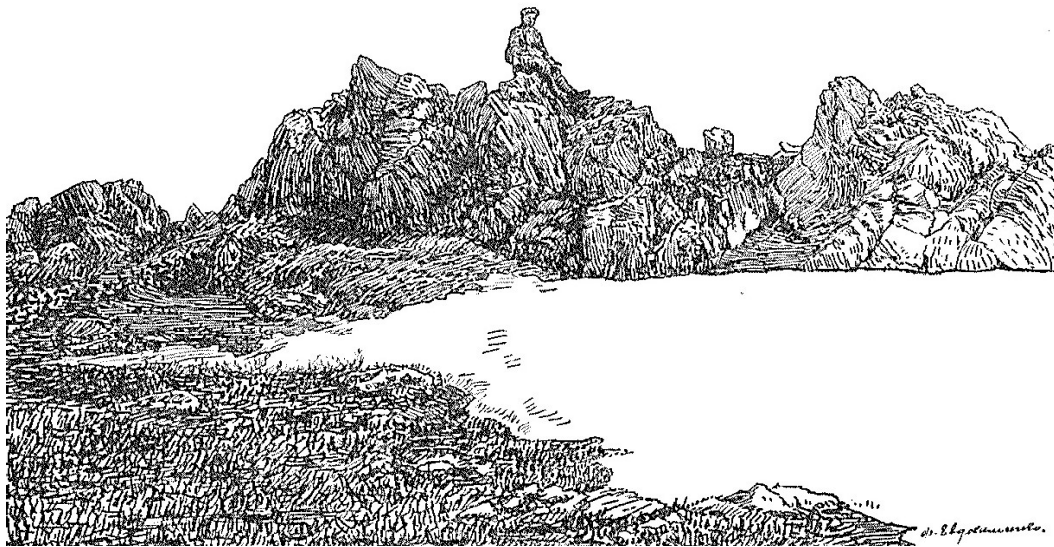


Рис. 3. Обнажение анортозита [1, рис. 3]

Fig. 3. Anorthosite outcrop [1, fig. 3]

чья): она прерывает розовато-серый крапчатый гранодиорит; и здесь он встречается в контакте с кварцевой плотной породой, более светлой, яшмовидной, с розоватыми неопределенной формы пятнами — остатками полевых шпатов. Дальше к югу гранодиорит сменяется серой пятнистой породой, близкой уже к кварцевому габбро» [1, с. 13–14]. Перечитываю и не могу избавиться от ощущения, что нахожусь в музее, а экскурсовод неспешно рассказывает о картине Малевича или Кандинского. В таком стиле написан весь отчет.

Описание геологической ситуации сменяется более детальной (с химическим и минералогическим модалным составом) характеристикой горных пород и (с химическим составом и оптическими параметрами) минералов. Все это тщательно обсуждается и аккумулируется в названии горной породы и выводе о ее генезисе. «От типичного спессартита, в смысле Rosenbusch'a, рассматриваемая порода отличается полным отсутствием пироксена и отступлением плагиоклаза на второй план, и этим как бы приближается к одиниту, который, однако, судя по приведенному анализу у Rosenbusch'a (1905), отличается от него химически. С Тилай-камня Duparc'ом (1905) была описана порода, названная им бербахитом; от бербахита Chelius, имея с ним общий

минералогический состав, порода с Тилай-камня отличается более высоким содержанием CaO , MgO и более низким содержанием Al_2O_3 . Если себе представить, что порода Тилай-камня пройдет процесс уралитизации, намеченный анализами Duparc и Hornung (1904), то в результате должна получиться порода, близкая к рассматриваемой. <...> Не входя в детальный разбор теории уралитизации Duparc и Hornung (A. Wilmore, Geol. Mag. 1910. Vol. 8. P. 357-367. — Ю. В.), укажу лишь, что: 1) Teall уже в 1888 г. указал, что это превращение не есть просто параморфическая перегруппировка частиц; 2) уралитизация обыкновенно сопровождается заметным для простого глаза увеличением меланократности породы; 3) как исходный, так и конечный продукты могут быть различны» [1, с. 26–27].

В целом О. О. Баклундом даны описания следующих горных пород. Для Обской тундры: диорит, геллеф-линт (диоритовый милонит), гранодиорит, кварцевое габбро, гранодиоритовый аплит, спессартит (роговообманковая порода), бербахит (эпидот-хлорит-амфиболит), авгитовый кварц-порфирит. Для г. Нарьяет-Кей: гарцбургит, лерцолит, анортозит (троктолитовый). Для Обдорских гор: гнейсы (кварцитовый, гранатовый, роговообманково-гранатовый, двуслюдяной альбитовый,

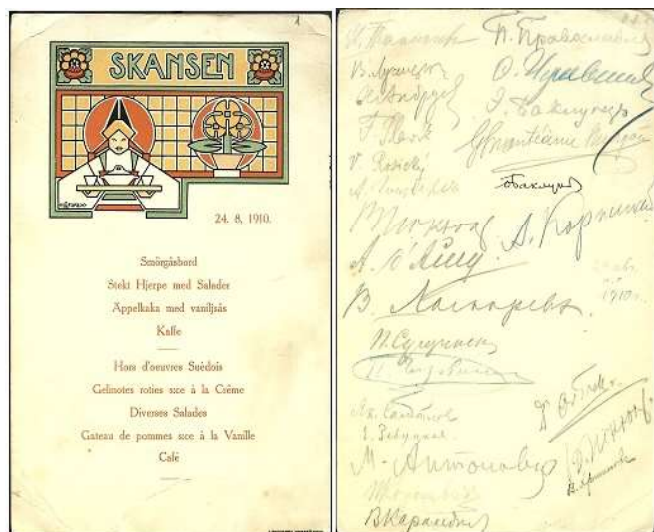


Рис. 4. Ресторанное меню с подписями участников XI МГК
Fig. 4. Restaurant menu with signatures of the participants of the 11th IGC

хлорит-альбитовый, эпидот-альбитовый), амфиболиты (альбитовый, гранатовый, эпидотовый, альбит-гранатовый, эпидот-альбитовый, хлорит-альбитовый (говардит и роговообманковый празинит), эпидот-горнблендитовый). По-видимому, значительная их часть должна считаться эталонной для Полярного Урала.

Заключение

Экспедиция Императорской академии наук, Геологического комитета и Русского географического общества 1909 г. внесла большой вклад в изучение Полярного Урала вообще и его геологии в частности. Это название для территории к северу от 66° с. ш. окончательно закрепилось в науке именно после экспедиции братьев Кузнецовых. Для О. О. Баклунда она означала школу самостоятельного руководства комплексной экспедицией и окунула в петрологические проблемы. Его научное кредо о метасоматическом генезисе гранитов, окруженных полями гнейсов и мигматитов, начало формироваться именно на Полярном Урале [4]. Успех экспедиции был отмечен Малой золотой медалью Русского географического общества.

В 1918 г. О. О. Баклунд не вернулся из командировки в Финляндию и Швецию, не приняв радикальных социальных преобразований в России и решив остаться на родине предков. Работал в университетах Або (Турку) и Упсалы, значительно повысив в них уровень преподавания и научных исследований в петрографии и петрологии. Был избран действительным членом шведской и финляндской академии наук, членом-корреспондентом 15 других академий и научных обществ. В 1937 г. был в Москве на XVII Международном геологическом конгрессе. Участвовал в Северной экспедиции в Хибины, где оставил восторженный отзыв в книге гостей, хранящейся в Кировском отделении Государственного архива Мурманской области: «Удивительное месторождение и искусная во всех отношениях работа. О. Баклунд. Университет Упсала, Швеция» [3, с. 54].

В заключение сообщим забавный исторический эпизод. В 1910 г. в Стокгольме состоялся XI Международный геологический конгресс. В нем участво-

вали 625 делегатов из 31 страны, в том числе 35 из России. На заключительном банкете супруга П. Н. Чирвинского предложила всем расписаться на обороте ресторанного меню, что и сделали 25 человек (рис. 4), среди них — герои нашего рассказа И. П. Толмачев (1-й, левая колонка), Ф. Н. Чернышев (2-й, правая колонка), О. О. Баклунд (5-й, там же) и ряд других выдающихся российских геологов [5]. Где еще вы найдете сразу столько исторических факсимиле? К слову, 24 августа 1910 г. в ресторане Skansen (работает до сих пор) гостям предлагали «шведские закуски, жареных рябчиков в сметане, яблочный торт с ванильным соусом и кофе» (пер. с фр. — Ю. В.).

Литература

1. Баклунд О. О. Горные породы Полярного Урала // Полярный Урал. Экспедиция бр[атьев] Кузнецовых. 1909. Вып. 3. С.-Петербург: Тип. Имп. АН, 1912. 151 с. (Отдельный оттиск из «Зап. Имп. АН». Сер. 8. Т. 28. № 3).
2. Баклунд О. О. Научные результаты экспедиции братьев Кузнецовых на Полярный Урал в 1909 году под начальством О. О. Баклунда: Репринтное издание 1911–1912 гг. СПб.: Альфарет, 2017. 320 с.
3. Войтеховский Ю. Л. 75 лет Северной экскурсии Международного геологического конгресса 1937 г. // Тиетта. 2012. № 3 (21). С. 51–54.
4. Скрипко К. А. Олег Оскарович Баклунд — геолог, петрограф, минералог, исследователь метеоритов // Жизнь Земли. 2018. № 40 (3). С. 355–364.
5. Шпаченко А. К., Войтеховский Ю. Л. Эпизод из истории XI МГК в Стокгольме, 1910 г. // Тиетта. 2012. № 3 (21). С. 55–60.
6. Harker A. Petrology for students. Cambridge: University Press, 1908. 336 p.

References

1. Backlund O. O. *Gornyye porody Polyarnogo Urala* (Rocks of the Polar Urals). O. O. Backlund. The Polar Urals. Expedition of br<others> Kuznetsov. 1909, issue 3. Saint Petersburg: Imp. Acad. Sci. Press, 1912, 151 p. [Separate print from «Proc. Imp. Acad. Sci.». Ser. 8, V. 28, No. 3].
2. Backlund O. O. *Nauchnyye rezul'taty ekspeditsii brat'yev Kuznetsovykh na Polyarny Ural v 1909 godu pod nachal'stvom O. O. Baklunda*. Reprintnoye izdaniye 1911–1912 gg. (Scientific results of the expedition of Kuznetsov brothers to the Polar Urals in 1909 under the command of O. O. Backlund. Reprint edition of 1911–1912). O. O. Backlund. St. Petersburg: Alfaret, 2017, 320 p.
3. Voytekhoysky Yu. L. *75 let Severnoy ekskursii Mezhdunarodnogo geologicheskogo kongressa 1937 g.* (75 years of the Northern Excursion of the International Geological Congress 1937). Yu. L. Voytekhoysky. Tietta. 2012, No. 3 (21), pp. 51–54.
4. Skripko K. A. *Oleg Oskarovich Backlund – geolog, petrograf, mineralog, issledovatel' meteoritov* (Oleg Oskarovich Backlund – geologist, petrographer, mineralogist, meteorite explorer). K. A. Skripko. Earth life, 2018, No. 40 (3), pp. 355–364.
5. Shpachenko A. K., Voytekhoysky Yu. L. *Epizod iz istorii XI MGK v Stokgol'me, 1910 g.* (An episode from the history of the XI IGC in Stockholm, 1910). A. K. Shpachenko, Yu. L. Voytekhoysky, Tietta, 2012, No. 3 (21), pp. 55–60.
6. Harker A. *Petrology for students*. Cambridge: University Press, 1908, 336 p.



ЯНУЛОВ. К 100-ЛЕТИЮ ВОИНА И ЗАМЕЧАТЕЛЬНОГО КРИСТАЛЛОГРАФА

В. И. Силаев, А. М. Асхабов, А. Ф. Хазов, П. П. Юхтанов

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

silae@geo.komisc.ru

Статья посвящена научной биографии видного отечественного кристаллографа Кирилла Паскальевича Янулова (1920–2004), научным руководителем которого был выдающийся ленинградский кристаллограф Осип Маркович Аншелес (1885–1957), ученик Е. С. Фёдорова. Дан анализ важнейших научных достижений К. П. Янулова.

Ключевые слова: научная биография, К. П. Янулов, кристаллография, минералогия.

YANULOV. THE 100TH ANNIVERSARY OF THE WARRIOR AND WONDERFUL CRYSTALLOGRAPHER

V. I. Silaev, A. M. Askhabov, A. F. Khazov, P. P. Yukhtanov

Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The article is devoted to the scientific biography of the prominent Russian crystallographer Yanulov Kirill Paskalievich (1920–2004), whose supervisor was the outstanding Leningrad crystallographer Osip Markovich Ansheles (1885–1957), E. S. Fedorov's disciple. We analyzed his most important scientific achievements.

Keywords: scientific biography, Yanulov, crystallography, mineralogy.

*Настоящее есть следствие прошедшего, а потому
непосредственно обращай взор свой на зады,
чем сбережешь себя от знатных ошибок.*

Козьма Прутков¹

Кирилл Паскальевич Янулов (1920–2004) родился в городе Боровичи Новгородской области. Этот городок и сейчас очень маленький (почти в 5 раз меньше Сыктывкара), а в те годы и вовсе был микроскопическим, но с богатой историей — Смутное время, Русско-шведская война 1610–1617 гг., ссылка в окрестности города в 1797–1798 гг. генерал-фельдмаршала и будущего генералиссимуса Российской империи Александра Васильевича Суворова. Таким образом, К. П. Янулов — из коренных северных русских, что всегда чувствовалось по его «нордическому» характеру. Последнее вовсе не случайность. Как сообщает современная ДНК-генеалогия, у северных русских дополнительно к общей для восточных славян гаплогруппе R1a1 в значительной концентрации примешана восточно-скандинавская гаплогруппа N1C1. Вот и получились такие славяновикинг.

Перед Великой Отечественной войной Кирилл Янулов поступил в Ленинградский государственный университет на геолого-почвенное отделение геолого-почвенно-географического факультета. Именно этот факультет впоследствии и превратился в знаменитый теперь геологический факультет ЛГУ (СПбГУ).

¹ Эпиграф к последней прижизненной статье К. П. Янулова «Решетки Браве и их классификации» (Труды Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2002. Т. 32. Вып. 110. С. 5–21).

В 1943–1944 гг. на фронте был командиром пулеметного взвода, потом командиром пулемётной роты, затем заместителем командира пехотно-огневого батальона. Орденоносец, демобилизован после тяжелого ранения в конце 1944 г.

В 1945 г. вернулся на учебу в университет, где встретил свою первую жену — Марину Константиновну, студентку со старшего курса, специализировавшуюся в минералогии. Вместе молодожены прожили недолго. Марина после окончания ЛГУ уже в 1945 г. получила направление в Сталинабад (с 1961 г. Душанбе), в Институт геологии Таджикской ССР, на должность младшего научного сотрудника (рис. 1). Ее мужу Кириллу предстояло учиться еще год. Закончив университет, он также распределился в таджикский Институт геологии, где сразу занялся организацией рентгеновской лаборатории. В то время это было очень актуальным — в геологии началась послевоенная научно-техническая революция. Правда, заниматься этим нелегким делом Кириллу Паскальевичу пришлось сравнительно недолго: его отозвали в Ленинград для поступления в очную аспирантуру.

Научным руководителем и учителем К. П. Янулова стал выдающийся ленинградский кристаллограф **Осип Маркович Аншелес** (1885–1957), который, в свою очередь, был учеником **Е. С. Фёдорова** (рис. 2). К многочисленным областям исследований О. М. Аншелеса относились кристаллооптика, иммерсионный метод, выращивание кристаллов, вычислительные и графические методы кристаллографии. В 1960-е годы он стал известен своей оригинальной гипотезой образования округлой формы у мантийных алмазов. В отличие, например, от А. А. Кухаренко и Ю. Л. Орлова, Осип Маркович



Рис. 1. Студенты-молодожены — Кирилл и Марина Януловы на фоне альма-матер — Ленинградского государственного университета (фото 1950-х годов) и первого места работы — Института геологии АН ТаджССР, теперь это Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Республики Таджикистан

Fig. 1. Just married students — Kirill and Marina Yanulov against their alma mater — Leningrad State University (1950s photo) and first place of work — Institute of Geology of the Academy of Sciences of the Tajik SSR, now it is the Institute of Geology, Antiseismic Engineering and Seismology of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan

и один из первых исследователей восточно-сибирских алмазов М. А. Гневушев считали такие формы результатом не растворения, а роста, объясняя это последовательным сокращением площади нарастающих по нормам слоев с тенденцией к постепенному выклиниванию. В 1960-е годы на эту тему шла нешуточная дискуссия, в которой победу одержали сторонники гипотезы растворения, но кое-что перепало и их противникам.

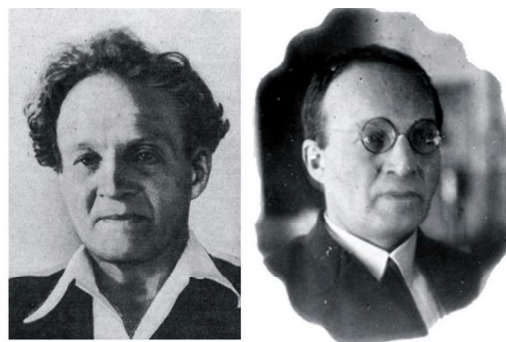


Рис. 2. Кристаллограф Осип Маркович Аншелес и некоторые его труды. Основатель кафедры кристаллографии Ленинградского университета. В блокадном Ленинграде и затем в эвакуации обеспечил совместно с В. Б. Татарским и А. А. Штернбергом выполнение оборонного заказа по выращиванию кристаллов сегнетовой соли на основе разработанного ими скоростного метода

Fig. 2. Crystallographer Osip Markovich Ansheles and some of his works. Founder of the Department of Crystallography at the Leningrad University. In the besieged Leningrad and then in the evacuation, he ensured, together with V. B. Tatarsky and A. A. Sternberg, the implementation of the defense order for growing Rochelle salt crystals based on the speed method developed by them

Темой диссертационной работы К. П. Янулова стала кристаллография эпитаксиальных сростаний минералов, о чем конкретно речь пойдет ниже. В те годы серьезные исследования на этом важнейшем для специалистов по выращиванию кристаллов направлении только начинались. В 1948 г. была защищена первая по этой теме в СССР диссертация **В. А. Франка-Каменецкого**, тоже выпускника Ленинградского университета, фронтовика и орденоносца — об эпитаксиально-ориентированных сростаниях ксеноминеральных включений в барите. Кирилл Паскальевич свою диссертацию защитил в 1951 г. [16], став одним из первых специалистов в данной области.

В 1959 г. случилось первое пришествие К. П. Янулова в наш институт, но ненадолго — через два года он вернулся в Таджикистан, где развелся с первой женой. Впоследствии Марина Константиновна долгое время работала в Казахстане, защитила в 1962 г. кандидатскую диссертацию на тему «Минералогия скарново-барито-полиметаллического месторождения Кайгарлы (Центральный Казахстан)», стала там видным минералогом-рудником. Кирилл Паскальевич тоже путешествовал, сначала в Кольский ФАН СССР, потом в Кишиневский госуниверситет. Везде создавал рентгеновские лаборатории и воспитывал профильных специалистов. В Кишиневе он даже дослужился до заведующего кафедрой кристаллографии и минералогии. Но



ненадолго, вскоре геологический факультет закрыли, и он вернулся в Таджикистан.

Весной 1970 г. Кирилл Паскальевич по приглашению и уже со второй женой — Людмилой Алексеевной Хорошиловой — опять оказался в Сыктывкаре, на этот раз с прямым заданием: создать в нашем Институте полноценную лабораторию физических методов исследований — в основном методов рентгено-структурного, рентгенофазового анализа и термографии. Вторая его жена тоже была незаурядной личностью, так уж он умел выбирать своих женщин. Люся родилась в тяжелом 1942 году в селе Владимировка Белгородской области в семье потомственных крестьян. Девочка была очень умной, в 18 лет поступила на физико-математический факультет и, как ни странно, именно Таджикского государственного университета (рис. 3). В 1965 г. получила специальность «физик»² и в 1966 г. пришла работать в Институт геологии АН Таджикской ССР, в лабораторию рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа, т. е. практически к своему будущему мужу. В 1970 г. они поженились, переехали в Сыктывкар и с тех пор не расставались до неожиданной кончины Людмилы Алексеевны.

Задача, поставленная перед Кириллом Паскальевичем, была очень непростой — лабораторию надо было создавать практически с нуля. В Институте геологии Коми ФАН СССР тогда была только допотопная термическая установка ТУ-1М, на которой мог таинственно колдовать только Владимир Васильевич Беляев. Рентгеновское оборудование того времени было еще древнее. Но чета Януловых очень быстро включилась в работу, и уже к 1971 г. ситуация стала меняться. Сначала появилась порошковая рентгенодифракционная камера под метод Дебая–Шерера, потом появилась отечественная автоматическая термическая установка, за-

тем венгерский дериватограф и автоматический рентгеновский дифрактометр «Дрон» (рис. 4). Работа закипела. В итоге именно благодаря Кириллу Паскальевичу и Лидии Алексеевне Януловым в нашем институте научились достоверно определять минерально-фазовый состав горных пород и руд, открывать новые для севера Урала и Пайхойско-Новоземельской провинции минералы и минеральные месторождения, изобретать неслыханные ранее научные направления, например генетико-информационную минералогию и топоминералогию. И если в настоящее время в нашем институте появилось уникальное направление экспериментального изучения археологических и палеонтологических объектов как результат междисциплинарного сотрудничества со специалистами ИЯЛИ Коми НЦ УрО РАН, ИГГ УрО РАН, ИЭРиЖ УрО РАН, ИПОС СО РАН, ВСЕГЕИ и др., то в этом есть немалый вклад Кирилла Паскальевича, а также его замечательных сотрудников и, конечно, преемников, сохранивших и преумноживших возможности рентгеновского и термографического исследования минералов, горных пород и руд (рис. 5).

Понятно, что Кирилл Паскальевич по роду своих занятий был типичным «кабинетным ученым». Тем не менее он неоднократно выезжал на полевые работы в составе отрядов Н. П. Юшкина, и, надо признать, с немалой пользой. Фишкой кабинетного «ботаника», как выражается современная молодежь, было именно то, что Янулов очень хорошо на глаз определял минералы и как никто мог отбирать образцы для самых разных анализов. Делал он это скрупулезно, молчаливо, не вступая ни в какие трепдискуссии. А потом, уже в институте, на результатах диагностик и анализов объяснял глуповатым «экспедиционэрам», зачем именно они выезжали в поле и тратили государственные деньги.



Рис. 3. Молодой специалист-физик Людмила Алексеевна Хорошилова и ее альма-матер — государственный университет им. В. И. Ленина Таджикской ССР

Fig. 3. Young physicist Lyudmila Alekseevna Khoroshilova and her alma mater — Lenin State University of the Tajik SSR

² Удивительное было время — эпоха великой советской цивилизации, когда талантливая русская девочка из Белгородской области могла получить полноценное физико-математическое образование на самом краю империи. Нынче даже страшно подумать, каких специалистов готовят в бывшем Таджикском университете имени В. И. Ленина! Хотя, быть может, и не так все печально — таджики все-таки потомки просвещенных хорезмийцев и персов — создателей одной из первых супердержав в истории человечества.

Лично мне больше всего запомнилось его участие в полевых работах 1971 г. на Пай-Хое, когда пересеклись пути моего собственного маленького отряда с моторизованной ордой Н. П. Юшкина, за которой как раз и приглядывал К. П. Янулов (рис. 6). Упомянутые «ордынцы» тогда начали работать с Юго-Восточной Пайхойской периклинали, где вдруг выявили сульфидно-германиевую минерализацию. Потом доехали к нам на Центральную

Рентгеновский
дифрактометр «ДРОН-3»
X-ray diffractometer

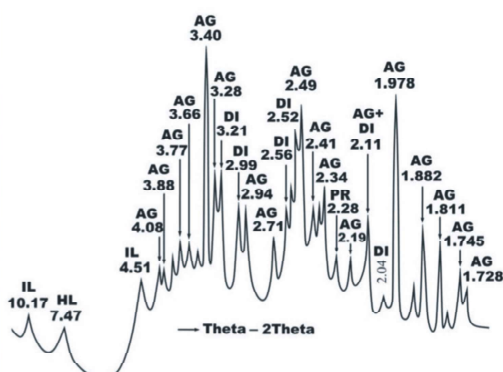
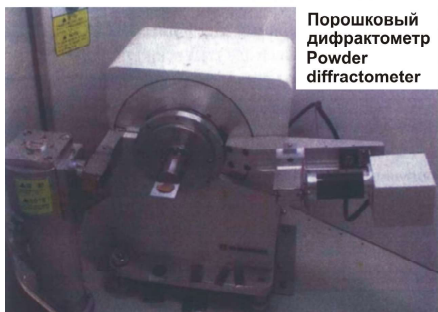
Порошковый
дифрактометр
Powder diffractometer

Дериватограф
Derivatograph


Рис. 4. Кое-что из появившегося при К. П. Янулове научного оборудования

Fig. 4. Some of the scientific equipment that appeared under K. P. Yanulov


Рис. 5. Ученики, сотрудники и преемники К. П. Янулова (слева направо): В. В. Хлыбов, Л. А. Хорошилова, Г. Н. Модянова, Г. Н. Лысюк (Юшкина), Б. А. Макеев, Ю. С. Симакова
Fig. 5. K. P. Yanulov's disciples, co-workers and successors (left to right): V. V. Khlybov, L. A. Khoroshilova, G. N. Modyanova, G. N. Lysyuk (Yushkina), B. A. Makeev, J. S. Simakova

Пай-Хой, забрав у меня Виталия Петровского, но оставив взамен Петра Юхтанова, в ту пору еще студента. После этого отправились на северо-запад к Амдерминскому флюоритовому месторождению, где и открыли знаменитое теперь проявление так называемого арктического янтара. Вот таким благотворным оказалось сотрудничество будущего академика с «кабинетным ученым» Кириллом Паскальевичем Януловым.

Как ученый, Кирилл Паскальевич Янулов был преимущественно кристаллографом, но очень глубоким — не только экспериментатором, но и теоретиком классического образца. При этом его кристаллография всегда пересекалась с минералогией, чем она нам теперь и особенно интересна.

Эпитаксиальные сростания кристаллов

Как было отмечено выше, эпитаксия была темой кандидатской диссертации К. П. Янулова. Суть этого феномена состоит в том, что в определенных условиях индивиды одного и того же или разных минералов могут срастаться таким образом, что хотя бы одно из кристаллографических направлений в индивидах совпадет. В природе такие сростания встречаются довольно часто, некоторые из них известны с давних пор как особенные горные породы, например так называемые письменные граниты (гранит-пегматиты, «еврейский шпат») — агрегат эпитаксиально сросшихся полевых шпатов и кварца (рис. 7). Однако такие сростания не сразу стали восприниматься как источник конкретной генетической информации. Лишь с развитием синтеза стало понятно, что эпитаксия может позволить получать кристаллосырье с особыми свойствами, иногда неповторимое никаким иным способом. Вот тогда и возник настоящий интерес к эпитаксиальным (или эпитаксическим) сростаниям.

В 1950-х гг. выяснилось, что эпитаксические сростания позволяют реконструировать условия минера-

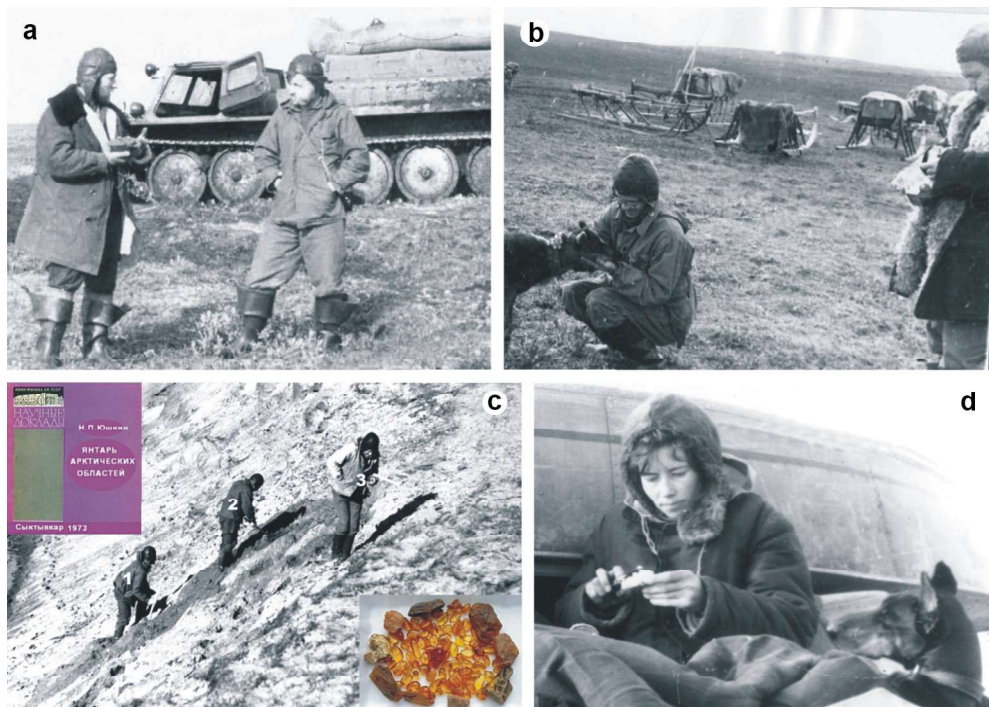


Рис. 6. Полевые странствия 1971–1972 гг.: а, б — Юго-Восточный Пай-Хой, Янулов учит уму-разуму легендарного Лёню Романцова — «человека и вездехода» и приглядывает за братанием студента Юхтанова с олененком; с — Северо-Западный Пай-Хой, прослеживание обнаруженной В. А. Петровским янтарной палеороссыпи в борту реки Песчаной (1 — Н. П. Юшкин, 2 — В. А. Петровский, 3 — К. П. Янулов); д — в маршруте по Вайгачу, Людмила Алексеевна Янулова делится с Никой последним бутербродом

Fig. 6. Field wanderings in 1971–1972: а, б — Southeastern Pay-Khoy, Yanulov is lecturing legendary Lenya Romantsov — an off-road man and controlling student Yukhtanov's fraternity with a fawn; с — Northwestern Pay-Khoy, tracking the amber paleoplacer discovered by V. A. Petrovsky at the flange of the Peschanaya river (1 — N. P. Yushkin, 2 — V. A. Petrovsky, 3 — K. P. Yanulov); д — on the route along Vaigach, Lyudmila Alekseevna Yanulova shares her last sandwich with Nika

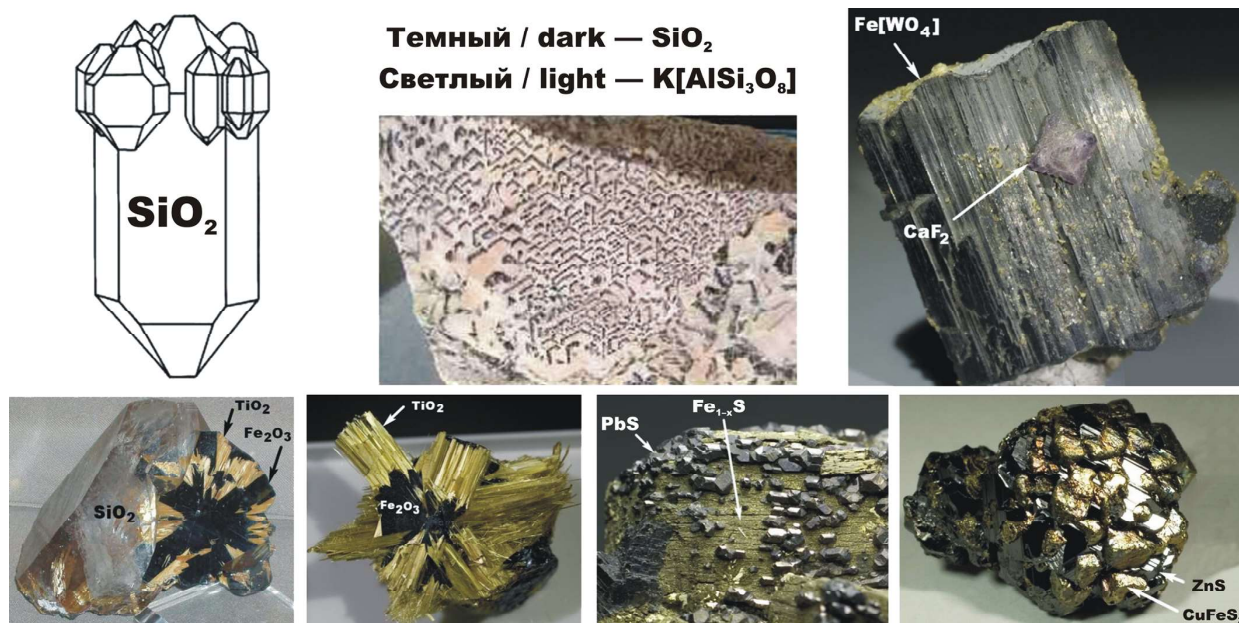


Рис. 7. Примеры встречающихся в природе эпитаксиальных сростаний минералов

Fig. 7. Samples of naturally occurring epitaxial intergrowths of minerals

лообразования и в мантийных средах. Пионером в этой области стала легендарная С. И. Футергендлер [10], занимавшаяся в Ленинграде рентгеновской кристаллографией природных алмазов и разработавшая свой метод на основе экспериментов В. А. Франк-Каменецкого и К. П. Янулова. Полученные уже Футергендлер данные [11] показали, что подавляющее большинство минералов-включений находится в алмазах именно в состоя-

нии эпитаксических сростаний, что свидетельствует, во-первых, о сингенетичности минералов-узников и алмаза-хозяина, а во-вторых, о соразмерности параметров элементарных ячеек алмаза и минералов-включений в момент их кристаллизации в мантии, т. е. в НРНТ-обстановке. После эксгумации алмазов эта соразмерность нарушается из-за различий в коэффициентах термического сжатия сросшихся минералов, что неизбеж-

Сингония Syngony Тип решётки Grid type	Триклин- ная Triclinic	Моно- клинная Mono- clinic	Ромби- ческая Rhombic	Тетраго- нальная Tetra- gonal	Триго- нальная Trigonal	Гексаго- нальная Hexa- gonal	Кубичес- кая Cubic
Примитивный Primitive							
Базоцентри- рованный Base centered							
Объёмно центрирован- ный Volume centered							
Гранецентри- рованный Face centered							

Рис. 8. Решетки Огюста Браве

Fig. 8. Auguste Bravais lattices

но ведет к возникновению упругих деформаций, кото-
рые можно наблюдать, анализировать и использовать
для расчета величин первоначальных температур и дав-
лений мантийного алмазообразования [1, 2, 5–7, 18].

Молекулы Рене Гаюи, шары Уильяма Волластона, решетки Огюста Браве, параллелоиды Евграфа Фёдорова и Георгия Вороного, многогранники Бориса Делоне и сорта решёток Браве от Кирилла Янулова

Основным научным интересом К. П. Янулова всю
жизнь была теория кристаллического строения, особен-
но феномен решеток Браве. Именно этим решеткам бы-
ла посвящена последняя его научная публикация. Как
известно, теория строения кристаллов началась с идеи
их построения из плотно заполняющих пространство
многогранных «интегральных молекул» — корпускул
Рене Гаюи. Однако такая гипотеза не смогла объяснить
существование кристаллов только с октаэдрической
спайностью. Обнаружившееся противоречие преодолел
Уильям Волластон³, заменивший «молекулы» Гаюи
точками в центре шаров, которые выстраивались в ре-
шетку. Так объявился принцип решеточного строения
кристаллов, открывший путь построения математиче-
ских теорий кристаллических структур. В сущности, это
была поистине великая научная революция, и первым
ее маршалом стал **Огюст Браве**, который в середине XIX
века вычислил 14 типов ячеек, описывающих, как он
считал, любую систему точек-узоров кристаллической
структуры. Именно к такой системе стало возможным
применить принцип симметрии, что связало матема-

тическую теорию решеток с миром натуральных кри-
сталлов и сделало возможным подразделить последние
на семь классов-сингоний (в последовательности сни-
жения симметричности): кубическую, гексагональную,
тригональную, тетрагональную, ромбическую, моно-
клинную, триклинную.

После этого и наступила эпоха теорий заполне-
ния пространства выпуклыми, равными по размеру
и смежными по плоскостям многогранниками, на-
званными **Евграфом Федоровым** параллелоэдрами.
Оказалось, что таких фигур может быть только четы-
ре — куб, гексагональная призма с пинакоидом, ромбо-
декаэдр и федоровский кубооктаэдр с 36 равными ре-
брами. Выяснилось, что все остальные параллелоэдры,
описывающие реальные кристаллы, могут быть матема-
тически выведенными из этих федоровских фигур пу-
тем однородных деформаций. Вот так Е. С. Федоров и
получил все типы решеток Браве, которые он сам рас-
сматривал лишь как абстрактные геометрические мо-
дели, в чем оказался не совсем прав⁴.

В начале XX века российский математик и геометр
Георгий Вороной заменил параллелоэдры Федорова соб-
ственными «примитивными параллелоэдрами» или об-
ластями трехмерной решетки, сосредоточенными во-
круг отдельных точек-узлов. Это, как показал другой рос-
сийский кристаллограф, **Юрий Вульф**, открыло путь к
практически бесконечному сближению математических
теорий кристаллической структуры со строением реаль-
ных кристаллов, что фактически и стало предвестником
рентгеноструктурного анализа. Уже в 1930-е гг.

³ В его честь назван минерал волластонит.

⁴ Например, **И. И. Шафрановский** успешно трактовал облики
алмаза, кварца, циркона именно с позиций решеток Браве,
учитывая при этом симметрию пространственной группы
соответствующего кристаллического вещества.



еще один российский математик, **Борис Делоне**, решил проблему однозначной установки кристаллов с учетом геометрических особенностей решеток Браве, чем обеспечил рентгеновский анализ системой угловых и линейных координат, позволяющих количественно определять параметры кристаллических решеток. В итоге Б. Н. Делоне осуществил полный вывод всех возможных параллелепедов и на этой основе установил факт существования в природе только 24 сортов решеток Браве и 33 подсортов параллелепипедальных систем. Это и есть классическая база современной физической кристаллографии.

Однако для минералов такой базы оказалось недостаточно, поскольку минералы характеризуются непредсказуемо большим разнообразием реальных форм, обусловленным очень широкими вариациями условий кристаллизации. Именно поэтому работа с решетками

Браве продолжается. Вклад самого К. П. Янулова в это замечательное дело состоит в следующем. Он путем довольно непростых вычислений получил собственные таблицы 24 сортов решеток Браве, снабдив их символами Делоне (рис. 9). В этих таблицах есть весьма ценная для минералогов новация. Кирилл Паскальевич кристаллографически обоснованно поменял положения тригональной и тетрагональной сингоний, что сблизило ромбоэдрические решетки с кубическими, а тетрагональные с ромбическими. Это, между прочим, очень логично выглядит с позиций федоровских однородных деформаций. В результате януловской новации гексагональные решетки объединились с тригональными, с которыми у них много общего — одни и те же простые формы, близкая четырехкоординатная установка кристаллов, наличие в ряде ромбоэдрических пространственных групп гексагональной под-

a	Гепта ПВ / Hepta PV		Гекса ПВ / Hexa PV		Три ПВ Three PV	Тетра ПВ Tetra PV
K						
R						
H						
Q						
O						
M						
T						

b	Гепта ПВ Hepta PV		Гекса ПВ / Hexa PV		Три ПВ Three PV	Тетра ПВ Tetra PV	Вид деформации Type of deformation
K							Растяжение Tension [100][110][111]
R							
H							Растяжение / Tension [100][110] Моноклинный сдвиг Monoclinic shift [110]
Q							Моноклинный сдвиг Monoclinic shift
O							Триклинный сдвиг Triclinic shift
M							
T							

Рис. 9. Основная расширенная (а) и вспомогательная (б) таблицы 24 сортов решеток Браве от К. П. Янулова

Fig. 9. Main expanded (a) and auxiliary (b) tables of 24 varieties of Bravais lattices according to K. P. Yanulov

группы переносов. Именно поэтому ромбоэдрическую решетку можно рассматривать как дважды заселенную гексагональную, а примитивную гексагональную ячейку можно представить в виде дважды заселенной ромбоэдрической.

Лейкоксен

Первый раз появившись в институте (1959–1961 гг.), Кирилл Паскальевич занялся проблемой фазового состава так называемого лейкоксена — очень микрзернистого, но при этом полиминерального продукта преобразования титановых минералов преимущественно в экзогенных условиях. В то время еще не было рентгеноспектральных микронзондовых технологий, поэтому единственным методом определения микрофазового состава такого рода образований был рентгеновский анализ. Но для такого сложного объекта требовался и особый специалист, такой как К. П. Янулов. Его помощницей в этом деле стала молодая минералогиня Ирина Чулкова, известная теперь как Ирина Владимировна Швецова. В результате довольно кропотливых работ, практически впервые, по крайней мере в СССР, наши герои установили, что пресловутый лейкоксен в девонских песчаниках Южного Тимана весьма широко варьируется по микрофазовому составу даже в части титановых минералов. Среди последних были надежно диагностированы рутил и анатаз (тетрагональные фазы TiO_2), брукит (ромбический TiO_2), псевдуртил $Fe_2Ti_3O_9$, реликтовый ильменит. В качестве примесей к титановым минералам в лейкоксене были выявлены кварц и оксигидроксиды железа. Исследователи пришли к выводу, что образование лейкоксена произошло за счет ильменита в результате выноса железа с образованием последовательности новообразованных минералов: ильменит → псевдуртил → рутил, анатаз, брукит. На основании рентгенографических данных было установлено, что новообразованные минералы распределяются в лейкоксенах неравномерно с образованием рутиловой, анатазовой и редкой брукитовой разновидностей [14, 17]. Впоследствии исследования тиманского лейкоксена, получив сильный импульс от К. П. Янулова, никогда не затухали ни у нас в институте, ни за его пределами, получив особое развитие в на-

правлении усовершенствования технологии обогащения, переработки и комплексного использования природного лейкоксенового сырья [3, 4, 8, 9].

Германит и другие германиевые сульфиды

Как отмечалось выше, в полевом сезоне 1971 г. на Юго-Восточном Пай-Хое при участии К. П. Янулова было открыто первое в европейском секторе Российской Субарктики проявление германита. Германиевая минерализация обнаружилась в среднем течении р. Силваяха, в альпийских кварц-карбонатных жилах, залегающих в интенсивно дислоцированных известняках и углеродисто-кремнисто-глинистых сланцах нижнего карбона. Германит здесь концентрируется в зальбанд-оторочках жил, будучи представленным кристаллографическими индивидами размером 100–500 мкм. По габитусу индивиды подразделяются на преобладающие тригонитетраэдрические и тетраэдрические (рис. 10). В ассоциации с германитом были установлены сульванит медистый с примесью германия и марганцовистый сфалерит, вюрцит.

В дальнейшем на Пай-Хое были выявлены и другие минералы группы колусита, систематические исследования которых осуществила Людмила Алексеевна Хорошилова, защитив в конце 1980-х гг. кандидатскую диссертацию [12, 13]. В настоящее время в эту группу входят пять минералов: *колусит* $Cu_{12}V(Sb,As,Sn)_3S_{16}$; *германоколусит* $Cu_{13}V(Ge,As)_3S_{16}$; *германит* $Cu_{13}Fe_2Ge_2S_{16}$; *ванадиево-мышьяковый германит* $Cu_{12-14}(As,V,Ge,Sn)_4S_{32}$; *сульванит* $Cu_{12}V(Sb,As,Sn)_3S_{16}$ и *арсеносульванит* $Cu_{12}(As,V)_4S_{16}$.

Симметрия минерального мира Земли и некоторых космических объектов

Вершиной творчества кристаллографа К. П. Янулова можно считать его активное участие в разработке законов симметрии минерального мира [15]. Понятно, что основную роль в этом проекте сыграл академик Н. П. Юшкин, но именно Кириллу Паскальевичу принадлежит конечное формулирование некоторых важнейших закономерностей кристаллосимметрий-

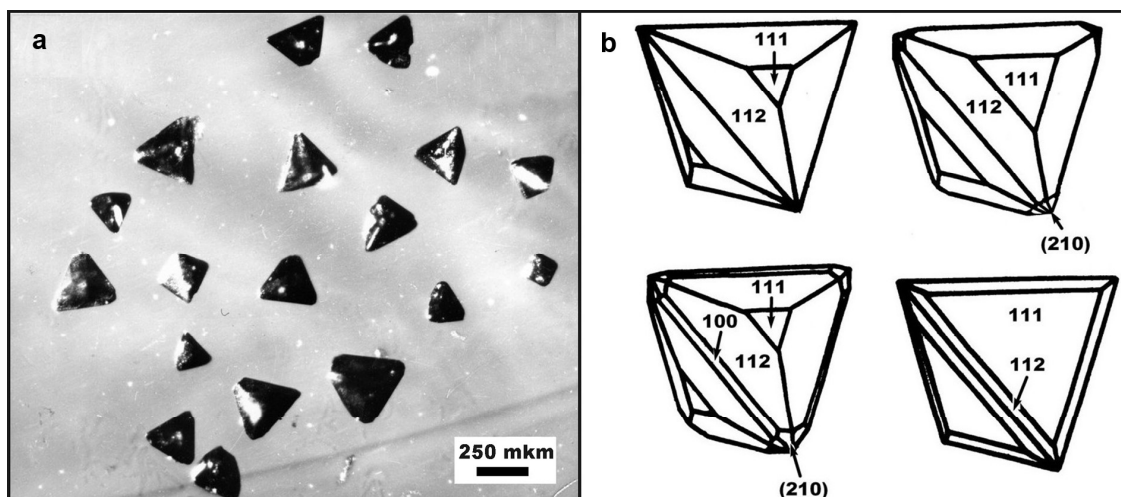


Рис. 10. Пайхойский германит: внешний вид (а) и габитус индивидов (б)

Fig. 10. Pay-Khoi germanite: appearance (a) and habitus of individuals (b)



ной селекции минералов на уровне пространственных групп и видов симметрии. Эта селекция выражается в резкой неравномерности, с одной стороны, распределения минералов по пространственным группам и видам симметрии, а с другой — встречаемости пространственных групп и видов симметрии в сводном континууме минералов. Так, проведенными расчетами Кирилл Паскальевич показал, что более 50 % известных нам минеральных видов относятся только к 10–12 (4–5 %) пространственным группам, а именно $P2_1/b$, $Pmna$, $P3m1$, $R3m$, $P4/nmm$, $P6_3/mmc$, $Ra3$, $Ia3$, $F43m$, $I43m$, $Fm3m$, $Fd3m$. В конкретном виде на примере сульфидов это можно показать следующим образом. В кубической сингонии по числу минеральных видов резко преобладает пространственная группа $Fm3m$, в гексагональной — $P6_3/mmc$, в тригональной — $P3m1$, в ромбической — $Pmna$, в моноклинной — $P2_1/b$. Картина распределения минералов по видам симметрии тоже очень впечатляет. Для сульфидов, например, в качестве видов-концентраторов выступают только 5 (16 %) видов: гексатетраэдрический, дигексаэдрический, дипирамидальный и призматический.

Конкретные причины такой селекции в минеральном мире пока не известны, хотя почти наверняка они в конечном счете проистекают из условий природного минералообразования. Раскрытие этой фундаментальной загадки будет означать большой скачок в знаниях кристаллосимметричных законов эволюции минерального мира. Так что у последователей Кирилла Паскальевича Янулова есть великолепный шанс!

Основные публикации К. П. Янулова

Янулов К. П. К вопросу об «изоморфном» нарастании натриевой селитры на кальцит // Записки ВМО. 1948. Вып. 77. № 1. С. 104.

Янулов К. П., Янулова М. К. О силлиманите из пегматитовых жил Енского месторождения // Записки ВМО. 1948. Ч. 77. № 4. С. 280–284.

Янулов К. П., Чулкова И. В. Ориентированные псевдоморфозы рутила по ильмениту // Доклады АН СССР. 1960. Т. 140. № 1.

Янулов К. П., Чулкова И. В. Лейкоксен девонских песчаников Южного Тимана // Материалы по геологии Северного Урала и Тимана: Тр. Ин-та геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 3. Сыктывкар, 1962. С. 157–169.

Янулов К. П., Хорошилова Л. А. Применение дифрактометра ГУР-3 при морфологических исследованиях кристаллов // Записки ВМО. 1966. Ч. 95. № 6. С. 755–757.

Янулов К. П., Дыцук Ю. И., Могаровский В. В., Хорошилова Л. А., Стрелкова В. Н. Фиброферрит из района оз. Рангуль (Восточный Памир) // Записки ВМО. 1971. Ч. 100. № 3. С. 362–366.

Мальков Б. А., Малькова Н. А., Попова Т. Н., Янулов К. П. Фазовый состав титаномагнетита из мончикитов // Очерки общей и региональной минералогии. Минерал. сб. № 1. Сыктывкар, 1971. С. 52–58. (Тр. Ин-та геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 15).

Плотников М. А., Янулов К. П. О соде в верхнепермских отложениях Западного Притиманья // Ежегодник-1971: Сборник о важнейших результатах научных исследований Института геологии. Сыктывкар, 1972. С. 92–94.

Янулов К. П., Юшкин Н. П., Хорошилова Л. А., Баширова Н. Ф. Минералогия и типоморфизм сфалерита

из рудных месторождений Пай-Хоя // Магматизм, метаморфизм и металлогения севера Урала и Пай-Хоя. Сыктывкар, 1972. С. 84–86.

Янулов К. П. Фактор повторяемости для кристаллов кубической сингонии в методе Дебая // Ежегодник-1971: Сборник о важнейших результатах научных исследований Института геологии. Сыктывкар, 1972. С. 195–199.

Янулов К. П. О систематике кристаллографических двумерных пространственных групп // Геология и полезные ископаемые северо-востока европейской части СССР: Ежегодник-1973. Сыктывкар, 1974. С. 169–173.

Янулов К. П. Прямая и обратная решетки кристалла // Ученые записки ЛГУ. 1974. № 378. Сер. геол. наук. Вып. 15. Кристаллография и кристаллохимия. Вып. 3. С. 202–205.

Юшкин Н. П., Брызгалов И. А., Янулов К. П. Минералогия и физические свойства сульванита // Минералы и парагенезисы минералов гидротермальных месторождений. Л.: Наука, 1974. С. 76–93.

Юшкин Н. П., Еремин Н. И., Янулов К. П., Хорошилова Л. А. Ванадиево-мышьяковый германит из пайхойских месторождений: первое подтверждение открытия минерала и таксономическое положение в группе германита // Зап. ВМО. 1975. 104. № 1. С. 28–40.

Янулов К. П. Подвиды решеток Браве и их классификация // Геология и полезные ископаемые северо-востока европейской части СССР. Ежегодник-1974. Сыктывкар, 1975. С. 129–134.

Янулов К. П., Васильев В. А., Хорошилова Л. А. Минеральный состав метеоритной пыли с Восточного Памира // Тр. Ин-та геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 21. Сыктывкар, 1975. С. 51–58.

Янулов К. П., Хорошилова Л. А. О структуре сульванита // Минералогия рудных месторождений севера Урала и Пай-Хоя. Сыктывкар, 1976. С. 51–55.

Юшкин Н. П., Янулов К. П. Развитие, состояние и направление минералогических исследований в Институте геологии Коми филиала АН СССР // Минералогия рудных месторождений севера Урала и Пай-Хоя: Минерал. сб. № 2. Сыктывкар, 1976. С. 3–13. (Тр. Ин-та геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 20).

Янулов К. П. Правильные системы фигур и точек на плоскости // Минералогия рудных месторождений севера Урала и Пай-Хоя. Сыктывкар, 1976. С. 14–16.

Янулов К. П. Принцип симметрии Кюри и двойникование микроклина // Проблемы генетической информации в минералогии. Сыктывкар, 1976. С. 67.

Янулов К. П. Стереографические проекции — графы видов симметрии кристаллов // Геология и полезные ископаемые северо-востока европейской части СССР: Тр. Ин-та геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 27. Сыктывкар, 1978. С. 113–117.

Янулов К. П. Воспоминания об Осипе Марковиче Аншелесе // Вопросы генетической и структурной кристаллографии: Тр. Ленинград. об-ва естествоиспытателей. 1979. 79. № 2. С. 36–40.

Янулов К. П. Двойники прорастания кристаллов гексатетраэдрического вида симметрии // Минералог. сб. № 10. Сыктывкар, 1982. С. 47–50. Тр. Ин-та геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 39.

Янулов К. П., Хорошилова Л. А. Симметрия и изоморфные замещения в минералах группы сульванита // Магматизм и металлогения Европейского Северо-Востока СССР. Сыктывкар, 1982. С. 86–87.



Хорошилова Л. А., Янулов К. П. Кристаллохимические особенности арсеносульванита и германита // Геология и полезные ископаемые Европейского Северо-Востока СССР. Сыктывкар, 1983. С. 55. (Тр. Ин-та геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 44).

Хорошилова Л. А., Янулов К. П. Рентгенографическая диагностика минералов групп сульванита и колусита // Минераловедение и минералогенезис: Минералог. сб. № 19. Сыктывкар, 1988. С. 70–79. (Тр. Ин-та геологии Коми НЦ УрО АН СССР. Вып. 66).

Янулов К. П. О точечной группе симметрии Th // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 1997. № 7 (31). С. 11–13.

Янулов К. П., Янулова Л. А. О связях классической симметрии и антисимметрии // Теоретическая, минералогическая и техническая кристаллография. Сыктывкар, 1998. С. 39–40.

Янулов К. П., Янулова Л. А. О связях классической симметрии и антисимметрии // Сыктывкарский минералог. сб. № 27. Сыктывкар, 1998. С. 27–30.

Янулов К. П. Решетки Браве и их классификации // Тр. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. Вып. 110. Сыктывкар, 2002. С. 5–21.

Литература

1. Горина И. Ф. Минералотермометрия алмазов // Кимберлитовый вулканизм и перспективы коренной алмазоносности северо-востока Сибирской платформы. Л.: Наука, 1971. С. 114–118.
2. Зюзин Н. И. О характере ориентировки включений граната в якутских алмазах // Геология и геофизика. 1967. № 6. С. 126–128.
3. Игнатьев В. Д., Бурцев И. Н. Лейкоксен Тимана: Минералогия и проблемы технологии. СПб.: Наука, 1997. 215 с.
4. Кочетков О. С. К вопросу о минералого-геохимических особенностях лейкоксенов // Литология и полезные ископаемые. 1964. № 6.
5. Мальков Б. А. Остаточные напряжения в минералах-узниках алмаза // Доклады АН СССР. 1976. Т. 227. № 6. С. 1432–1434.
6. Мальков Б. А. Эпитаксические срастания — индикаторы термодинамических условий образования алмаза // Известия АН СССР. Сер. геологическая, 1977. № 5. С. 84–85.
7. Мальков Б. А., Асхабов А. М. Эпитаксические срастания — индикаторы термодинамических условий природного синтеза // Доклады АН СССР. 1975. Т. 221. № 4. С. 938–941.
8. Махлаев Л. В. О природе лейкоксена в Ярегском нефтетитановом месторождении (в связи с оценкой перспектив других титановых палеороссыпей) // Литосфера. 2008. № 5. С. 117–121.
9. Перовский И. А., Бурцев И. Н. Влияние механоактивации лейкоксена на эффективность процесса его переработки по фторидному методу // Перспективные минералы. 2016. № 2. С. 66–73.
10. Силаев В. И., Мартиросян О. В., Трейвус Е. Б., Сухарев А. Е. «Есть существа, которые глядят на солнце прямо, глаз не закрывая» // Российское минералогическое общество глазами современников. СПб.: ЛЕМА, 2019. С. 52–71.
11. Футергендлер С. И., Франк-Каменецкий В. А. О эпитаксической природе некоторых включений в алмазах // Рентгенография минерального сырья. 1964. № 4. С. 97–107.
12. Хорошилова Л. А. Кристаллохимия и морфология минералов группы колусита и их структурных аналогов. Свердловск, 1987. 163 с.
13. Хорошилова Л. А., Франк-Каменецкая О. В., Рождественская И. В., Франк-Каменецкий В. А. Кристаллохимическая структура арсеносульванита // Минералогическая кристаллография и свойства минералов. Сыктывкар: ИГ Коми ФАН СССР, 1984. С. 78–83.
14. Швецова И. В. Минералы лейкоксена Ярегского месторождения. Л.: Наука, 1875. 127 с.
15. Юшкин Н. П., Шафрановский И. И., Янулов К. П. Законы симметрии в минералогии. Л.: Наука, 1987. 335 с.
16. Янулов К. П. Эпитаксальные срастания кристаллов // Автореф. канд. дис. Л.: ЛГУ, 1951.
17. Янулов К. П., Чулкова И. В. Лейкоксен девонских песчаников Южного Тимана // Труды ИГ Коми ФАН СССР. 1962. Вып. 3. С. 157–169.
18. Harris J. H., Milledge H. J., Barron T. H., Munn R. W. Thermal expansion of garnets included in diamond // J. Geophys. Res., 1970. V. 75. № 29. P. 5775–5792.

References

1. Gorina, I. F. *Mineralotermometriiaalmazov* (Mineralothermometry of diamonds) in *Kimberlitovyy vulkanizm i perspektivy korennoi almazonosnosti Severo-Vostoka Sibirskoi platformy* (Kimberlite volcanism and prospects of radical diamondiferousness of the North-East of the Siberian Platform), Leningrad: Nauka, 1971, pp. 114–118.
2. Zyuzin, N. I. *O haraktere orientirovki vliucheniï granata v iakutskikh almazakh* (On the character of orientation of inclusions of garnet in Yakut diamonds). *Geology and Geophysics*, 1967, No. 6, pp. 126–128.
3. Ignatiev, V. D., Burtsev, I. N. *Leikoksen Timana: Mineralogiia i problemy tekhnologii* (Leucoxen Timan: Mineralogy and problems of technology). St. Petersburg: Nauka, 1997, 215 p.
4. Kochetkov, O. S. *K voprosu o mineralogo-geohimicheskikh osobennostiakh leikoksenov* (On the question of the mineralogical and geochemical features of leucoxenes). *Lithology and Minerals*, 1964, No. 6.
5. Malkov, B. A. *Ostatochnye napriazheniia v mineralakh uznikakh almaza* (Residual stresses in minerals of prisoners of diamond). *Doklady USSR AS*, 1976, V. 227, No. 6, pp. 1432–1434.
6. Malkov, B. A. *Epitaksicheskie srastaniia — indikatory termodinamicheskikh uslovii obrazovaniia almaza* (Epitactic intergrowths - indicators of the thermodynamic conditions for the formation of diamond). *Izvestiya USSR AS. Ser. Geological*, 1977, No. 5, pp. 84–85.
7. Malkov, B. A., Askhabov, A. M. *Epitaksicheskie srastaniia — indikatory termodinamicheskikh uslovii prirodnogo sinteza* (Epitactic intergrowths — indicators of the thermodynamic conditions of natural synthesis). *Doklady USSR AS*, 1975, V. 221, No. 4, pp. 938–941.
8. Makhlaev, L.V. *O prirode leikoksena v Iaregskom nefitetitanovom mestorozhdenii (v sviazi s ocenoi perspektiv drugikh titanovykh paleorossypoi)* (On the nature of leucoxene in the Yaregskoye oil and titanium deposit (in connection with the assessment of the prospects of other titanium paleo-scattering)). *Lithosphere*, 2008, No. 5, pp. 117–121.
9. Perovsky, I. A., Burtsev, I. N. *Vliianie mekhanoaktivatsii leikoksena na effektivnost protessa ego pererabotki po fluoridnomu metodu* (The effect of mechanical activation of leucoxene on the efficiency of the process of its processing by the fluoride method). *Perspektivnyye mineraly*, 2016, No. 2, pp. 66–73.
10. Silaev, V. I., Martirosyan, O. V., Treivus, Ye. B., Sukharev, A. E. . *«Est sushchestva, kotorye gliadiat na solntse priamo, glaz ne zakryvaia»* («There are creatures that look directly at the sun without



closing their eyes»). Russian Mineralogical Society through the eyes of contemporaries. St. Petersburg: LEMA, 2019, pp. 52–71.

11. Futergendler, S. I., Frank-Kamenetsky, V. A. *O epitaksialnoy prirode nekotorykh vliucheni v almazakh* (On the epitaxial nature of some inclusions in diamonds). *Rentgenografiia mineralnogo syria*, 1964, No. 4, pp. 97–107.

12. Khoroshilova, L. A. *Kristallohimia i morfologiya mineralov gruppy kolusita i ikh strukturnykh analogov* (Crystal chemistry and morphology of the minerals of the colusite group and their structural analogues). Sverdlovsk, 1987, 163 p.

13. Khoroshilova, L. A., Frank-Kamenetskaya, O. V., Rozhdenskaya, I. V., Frank-Kamenetskiy, V. A. *Kristallohimicheskaia struktura arsenosulvanita* (Crystal structure of arsenosulvanite) in *Mineralogicheskaya kristallografiia i svoystva mineralov* (Mineralogical crystallography and properties of minerals). Syktyvkar: Institute of geology, Komi Branch of USSR AS, 1984, pp. 78–83.

14. Shvetsova, I. V. *Mineraly leikoksena Iaregskogo mestorozhdeniia* (Minerals of leucoxene of the Yaregskoye field). Leningrad: Nauka, 1975, 127 p.

15. Yushkin, N. P., Shafranovsky, I. I., Yanulov, K. P. *Zakony simmetrii v mineralogii* (Laws of symmetry in mineralogy). Leningrad: Nauka, 1987, 335 p.

16. Yanulov, K. P. *Epitaksialnye srastaniia kristallov* (Epitaxial intergrowths of crystals). *Extended abstract of Cand. Sc. Dissertation*, Leningrad State University, 1951.

17. Yanulov, K. P. Chulkova, I. V. *Leikoksen devonskikh peschanikov Iuzhnogo Timana* (Leucoxene of the Devonian sandstones of South Timan). Proceedings of Institute of geology Komi branch USSR AS, 1962, V. 3, pp. 157–169.

18. Harris, J. H., Milledge, H. J., Barron, T. H., Munn, R. W. Thermal expansion of garnets included in diamond, *J. Geophys. Res.*, 1970, vol. 75, no. 29, pp. 5775–5792.

Поступила в редакцию / Received 28.03.2020



КАМЕННЫЕ ЦВЕТЫ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ МУЗЕЕ ИМ. А. А. ЧЕРНОВА STONE FLOWERS IN CHERNOV GEOLOGICAL MUSEUM

Minerals often take amazing shapes such as «roses» or «stone flowers». They are resulted from the mosaic, block structure of crystals. «Iron Rose» with highlighted petals is formed by hematite, corundum, barite. «Desert Rose» is the term for gypsum crystals. And spherically radiant units are called «mineral suns».

Неживая природа удивительна своими необычайно красивыми минеральными образованиями. С XX в. начинается изучение форм кристаллов, онтогении минералов (работы А. Е. Ферсмана, И. И. Шафрановского, Д. П. Григорьева, А. Г. Жабина и др.). При этом чрезвычайно распространённое явление образования «каменных цветов» остается ещё не до конца изученным.

Расщепление кристаллов тесно связано с мозаичным, блоковым строением и является его разновидностью. Кристалл начинает расщепляться с противоположных концов, приобретая сначала форму вязки, затем снопа и, наконец, сферолита. Целый ряд мине-

ралов создают за счет расщепленного роста специфические агрегаты — «розы» или «каменные цветы». У кристаллических «роз» выделяют лепестки (субиндивиды). «Роза пустыни» (или «роза песков») — разговорное название сростков кристаллов гипса, выросших в пустынях в результате проникновения питающих растворов во вмещающую породу (фото 1). Ещё два столетия назад швейцарские старатели открыли «железную розу», которую образуют гематит, корунд, барит (фото 2).



Фото 1. Гипсовая роза. Казахстан. 777/762
Pic. 1. Gypsum rose. Kazakhstan. 777/762



Фото 2. Гематитовая роза. Приполярный Урал. 666/451
Pic. 2. Hematite rose. Subpolar Urals. 666/451

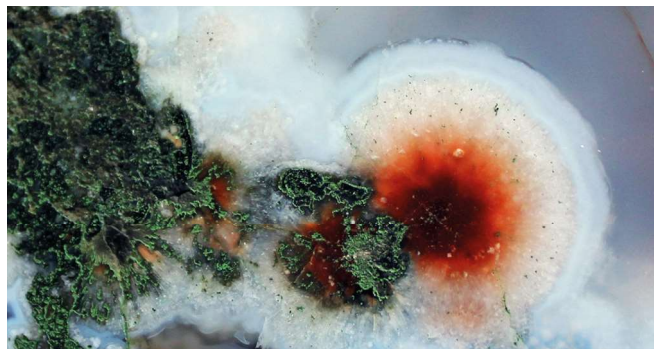


Фото 3. Сферолиты морденита. Тиман. 629/244
Pic. 3. Spherulites of mordenite. Timan. 629/244

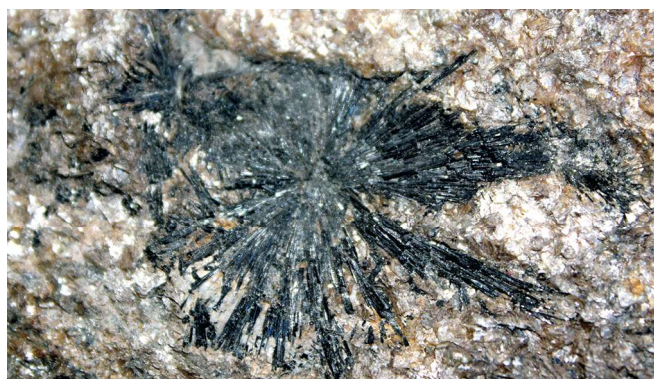


Фото 4. Турмалиновые солнца. Приполярный Урал. 666/745
Pic. 4. Tourmaline suns. Subpolar Urals. 666/745

Формы сферолитов могут образовываться при росте с близкой скоростью большого количества уплощенных игольчатых кристаллов из одного центра в разные стороны (фото 3). Такие формы выделения относятся к радиально-лучистым агрегатам. Типичным примером таких образований могут служить так называемые минеральные солнца. Коллекционеры минералов особенно ценят «турмалиновые солнца» — красивые розетки из черных, сине-зеленых, голубых и розовых кристаллов (фото 4).

К. г.-м. н. И. Астахова

Редакторы издательства:

О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка:

Р. А. Шуктомов

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 30.04.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 5,5. Тираж 140. Заказ 1133. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Адрес: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru

На обложке использованы фото И. Астаховой, А. Перетягина, П. Безносова, Е. Кушмановой