



Вестник



Март 2017 г., № 3 (267)

Института геологии Коми научного центра УрО РАН
Научно-информационное издание, основанное академиком Н. П. Юшкиным в 1995 г.

Содержание

Научные статьи

- Геолого-структурные особенности крупнообъемного
прожилково-вкрапленного золотосульфидного
оруднения Петропавловского месторождения
(Полярный Урал)
*Р. Х. Мансуров, А. В. Андреев,
С. С. Двуреченская, И. В. Викентьев* 3
- Об условиях образования диаспора в первичных
флюидных включениях в корунде месторождения Сутара
(Дальний Восток России)
С. Ю. Буравлева, О. В. Авченко, В. А. Пахомова 14
- Хромжелезистые метакolloидные образования
из белых карналлититов Верхнекамского месторождения
И. И. Чайковский, Е. П. Чиркова, Д. Е. Трапезников 20
- Вещественный состав и условия образования
пород пижемской свиты верхнего рифея
на возвышенности Очпарма (Южный Тиман)
Н. Ю. Никулова 28
- Статистическая характеристика пузыристости лав
трещинного Толбачинского извержения на Камчатке
А. С. Мяндин, К. В. Тарасов 35
- Диагностика природных теллуридов благородных металлов
методами рамановской спектроскопии и рентгеновской
микротомографии (рудопоявление «Савабейский», Пай-Хой)
*Р. И. Шайбеков, С. И. Исаенко,
А. В. Журавлев, А. Вымазалова* 39

Хроника, события, факты

- 50 лет в геохимии:
к 80-летию юбилею Я. Э. Юдовича 45
- Рентгенограф глини:
к 85-летию со дня рождения В. В. Хлыбова 48
- Ноев ковчег: легенды и факты
К 10-летию со дня открытия
экспозиции А. П. Боровинских 46

Хроника

6 марта — 80-летний юбилей Якова Эльевича Юдовича, главного научного сотрудника, доктора геолого-минералогических наук, заслуженного деятеля науки Российской Федерации.

С 8 по 29 марта сотрудники лаборатории петрографии А. А. Соболева и О. В. Удоратина в рамках совместных научных работ в Стэнфордском университете проводили геохронологические исследования пород севера Урала и Тимана.

19 марта — 30 лет трудовой деятельности старшего научного сотрудника лаборатории экспериментальной минералогии В. И. Катковой.

31 марта в рамках Дня геолога в Геологическом музее им. А. А. Чернова отмечали 10 лет коллекции А. П. Боровинских «Ноев ковчег».

В марте были поддержаны проект РФФИ № 17-05-00516а «Минералогия апоугольных импактных алмазов и сопутствующих углеродных фаз» (руководитель Т. Г. Шумилова) и проект РНФ № 17-17-01080 «Импактные стекла в ас-троблемах: фундаментальные и прикладные аспекты» (руководитель Т. Г. Шумилова).

Главный редактор А. М. Асхабов, зам. главного редактора О. Б. Котова,
ответственный секретарь Т. М. Безносова, тех. редактор Г. Н. Каблис, зав. редакцией Т. А. Некучаева

Редакционный совет — 2017:

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



Content

Scientific articles

- Petropavlovskoe lode gold deposit, the Polar Urals: geological and structural features of veinlet-disseminated gold-sulphide mineralization
R. Kh. Mansurov, A. V. Andreev, S. S. Dvurechenskaya, I. V. Vikentyev..... 3
- Conditions of formation of the diaspore in the primary fluid inclusions in corundum of the sutara deposit (Russian Far East)
S. Y. Buravleva, O. V. Avchenko, V. A. Pakhomova 14
- Cr-Fe metacolloidal nodules from the white carnallite rocks of the verkhnekamskoe salt deposit
I. I. Tchaikovsky, E. P. Chirkova, D. E. Trapeznikov..... 20
- Lythological and chemical composition and depositional conditions of the middle riphean metaclastic rocks in the Ochparma upland (South Timan)
N. Y. Nikulova 28
- Statistical characteristic of porosity in lavas of tolbachik fissure eruption, Kamchatka
A. S. Myandin, K. V. Tarasov..... 35
- Diagnostics of natural tellurides of noble metals using raman spectroscopy and x-ray microtomography (ore occurrence Savabeysky, Pay-Khoy)
R. I. Shaybekov, S. I. Isayenko, A. V. Zhuravlev, A. Vymazalova..... 39

Chronicle, events, facts

- 50 years in geochemistry: the 80th Jubilee of Ya. E. Yudovich 45
- Noah's ark: legends and facts
 The 10th anniversary of the opening of A. P. Borovinskikh's exposition 46
- X-ray specialist on clays: to the 85th anniversary of V. V. Khlybov 48

Chronicle

March 6 — the 80th Jubilee of Yakov Elyevich Yudovich, chief researcher, Doctor of geological and mineralogical sciences, honored worker of science of the Russian Federation.

March 8 — 29, the researchers of the Laboratory of Petrography A. A. Soboleva and O. V. Udoratina conducted geochronological researchers of the rocks from the Northern Urals and Timan at Stanford University within the joint scientific work.

March 19 — 30 years of work activity of the senior researcher of the Laboratory of Experimental Mineralogy V. I. Katkova.

March 31 — as part of the Day of Geologist at the Geological Museum named after A. A. Chernov we celebrated 10 years of A. P. Borovinsky's collection «Noah's Ark».

March — RFBR project No. 17-05-00516a «Mineralogy of apocool impact diamonds and accompanying carbon phases» (project manager T. G. Shumilova) is supported. RSF project No. 17-17-01080 «Impact glasses in astroblems: fundamental and applied aspects» (project manager T. G. Shumilova) is supported.

Chief Editor A. M. Askhabov, **Deputy Chief Editor** O. B. Kotova,
Executive Editor T. M. Beznosova, **Technical Editor** G. N. Kablis, **Managing Editor** T. A. Nekuchaeva

2016 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. Voytekhoysky, Apatity, Russia
Alexey D. Gvishiani, Moscow, Russia
Nikolay N. Gerasimov, Syktyvkar, Russia
Irina V. Kozyreva, Syktyvkar, Russia
Marko Komac, Ljubljana, Slovenia
Rustam I. Koneev, Tashkent, Uzbekistan
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 Mannik, Tallinn, Estonia
Alexander M. Pystin, Syktyvkar, Russia
Constance M. Soja, Hamilton, NY, USA
Oksana V. Udoratina, Syktyvkar, Russia
Mikhail A. Fedonkin, Moscow, Russia



ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРУПНООБЪЕМНОГО ПРОЖИЛКОВО-ВКРАПЛЕННОГО ЗОЛОТОСУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ ПЕТРОПАВЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Р. Х. Мансуров¹, А. В. Андреев¹, С. С. Двуреченская¹, И. В. Викентьев²

¹Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ), Москва

rinman81@bk.ru

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Москва

viken@igem.ru

Рассматриваются геолого-структурные особенности локализации, гидротермально-метасоматические образования и типы руд Петропавловского золоторудного месторождения, расположенного на севере Малоуральского вулканоплутонического пояса и входящего в состав среднепалеозойской островодужной системы Полярного Урала. Показана рудоконтролирующая роль тел порфировых диоритов поздней фазы внедрения собского комплекса. На месторождении выявлено два типа прожилково-вкрапленных руд — золотосульфидный, в основном определяющий золотоносность месторождения, и наложенный, сильно обогащенный Au золотомалосульфидно-кварцевый, в совокупности образующие сложные уплощенно-изометричные тела, местами переходящие в линейные штокверки. По структурно-морфологическим и минералого-геохимическим особенностям Петропавловское месторождение отнесено к золотопорфировому типу. Среди основных критериев такой типизации — пространственная ассоциация рудных тел с телами порфировых субвулканических фаз, штокверкоподобная позиция золоторудной минерализации, объемный характер рудно-метасоматической зональности и распределения рудных компонентов.

Ключевые слова: Полярный Урал, Петропавловское золотопорфировое месторождение, золотосульфидное крупнообъемное оруденение, линейно-штокверковое строение.

PETROPAVLOVSKOE LODE GOLD DEPOSIT, THE POLAR URALS: GEOLOGICAL AND STRUCTURAL FEATURES OF VEINLET-DISSEMINATED GOLD-SULPHIDE MINERALIZATION

R. Kh. Mansurov¹, A.V. Andreev¹, S. S. Dvurechenskaya¹, I. V. Vikentiev²

¹Central Research Institute of Geological Prospecting for non-ferrous and precious metals, Moscow

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow

The paper deals with geological and structural features, hydrothermal alteration, ore types of the Petropavlovskoe gold deposit located in the North of the Smaller Urals volcano-plutonic belt being the part of the Middle Paleozoic island arc system of the Polar Urals. The ore-controlling role of porphyry diorite bodies of the latest phase of intrusion has been detected. There are two ore types: gold-sulphide (main for the deposit) and gold-enriched gold-low-sulphide-quartz. The morphology and parameters of the gold-bearing mineralized zones and ore bodies are characterized. The Petropavlovskoe deposit can be referred to the gold-porphyry type on the base of its structural and morphological, mineralogical and geochemical features. Such specific features include: spatial association of gold mineralization with the bodies of porphyry intrusive phases; stockwork structure of gold-bearing zones; volumetric character of ore-alteration zoning and ore component distribution.

Keywords: the Polar Urals, Petropavlovskoe gold-porphyry deposit, lode gold-sulfide mineralisation, linear-stockwork structure.

Введение

Петропавловское золоторудное месторождение, расположенное на Полярном Урале (Ямало-Ненецкий автономный округ), входит в состав Новогодненского рудного поля Тоупугол-Ханмейшорского рудного района, который локализуется на севере полярно-уральского сегмента Малоуральского (Ауэрбаховско-Новогодненского) вулканоплутонического пояса (ВПП) (рис. 1) [6,14,18,19,22]. Данный район в ближайшем будущем может стать одним из новых золотодобывающих центров Российской Арктики [2,15]. Его перспективы определяются главным образом выгодным расположением: в 20 км от г. Лабытнанги и всего в нескольких километрах от железнодорожной ветки. В разные годы месторождения Новогодненского рудного поля, в том числе Петропавловское, изучались специалистами ЦНИГРИ, ОАО «Ямалзолото», ОАО «Ямальская ГК», ОАО «ПУГПП», ООО «Ямалгео», ООО «НПО Геосфера», ГИН РАН, ИГЕМ РАН, ИМГРЭ, УГГУ, РУДН и других организаций [11, 13, 14, 18, 25, 29–31].

Целью исследования является анализ геолого-структурных особенностей локализации Петропавловского золоторудного месторождения, отнесенного рядом исследователей [4, 6, 19, 37] к довольно редкому на планете золотопорфировому типу [24, 35]. Сведения по минеральному составу руд и формам нахождения в них золота приведены в публикации [3], в настоящей работе они даны кратко.

На Урале первое золотопорфировое месторождение — Березняковское на Ю. Урале — описано сравнительно давно [24]. В дальнейшем оно было переклассифицировано как эпitherмальное [23], хотя в ГКЗ РФ оно продолжает числиться как «мелкое золото-медно-порфировое». Есть и компромиссный вариант его классификации как «субвулканического (Cu)-Au-порфирового месторождения эпitherмального типа» [9]. Следующим стало Юбилейное золоторудное месторождение на крайнем юге Урала — в Мугоджарах [10, 34]. Однако оно остается слабоизученным, и доступ к нему ограничен компанией, ведущей добычу золотокварцевого (флюсового) сырья.

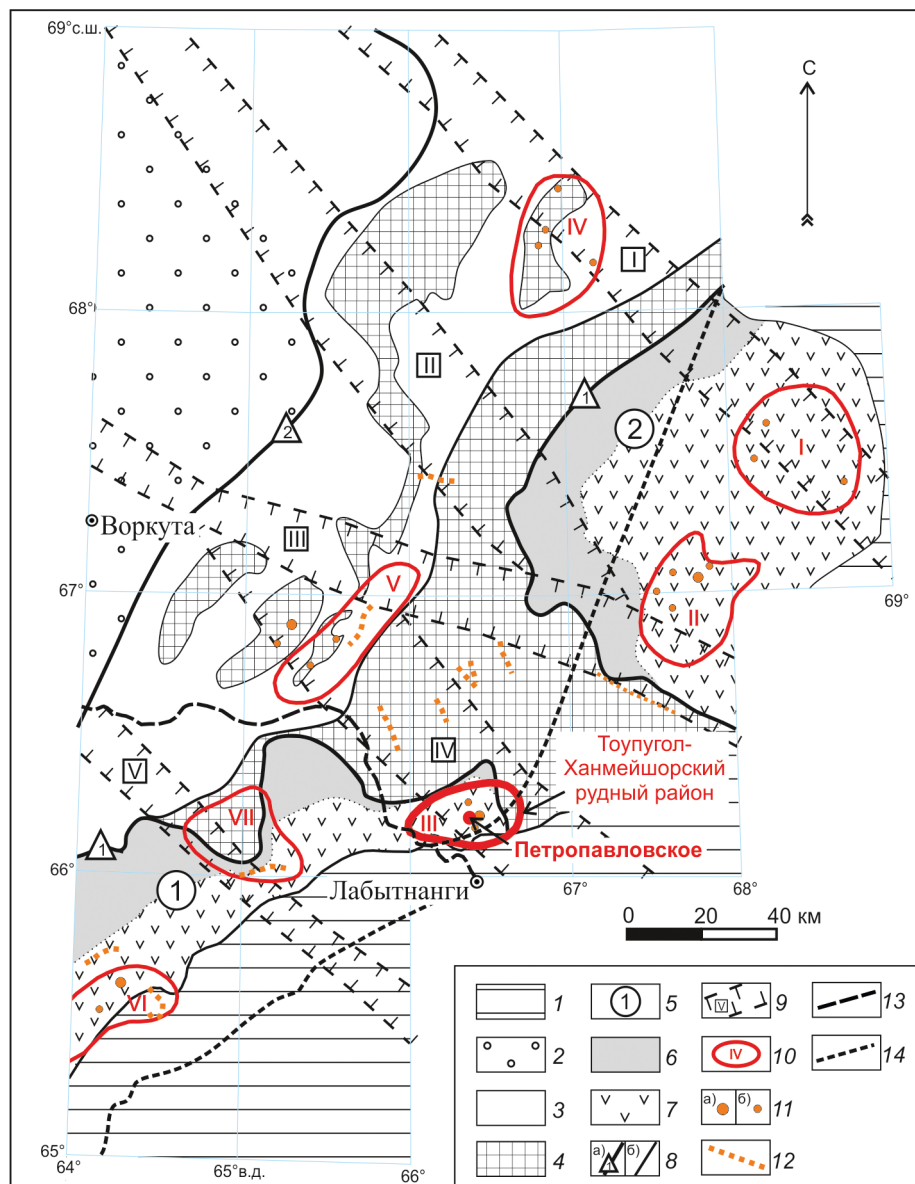


Рис. 1. Обзорная схема районирования и золотоносности Полярного Урала (составлено с использованием данных Е. В. Черныяева, ООО «НПО Геосфера»). **Условные обозначения:** 1–7 — основные тектонические элементы Полярного Урала: 1 — Западно-Сибирская плита; 2 — Предуральский краевой прогиб; 3 — Западно-Уральская мегазона; 4 — Центрально-Уральская мегазона; 5–7 — Тагильская мегазона: 5 — Войкарская (1), Щучинская (2) структурно-формационные зоны; 6 — Войкарско-Щучинский офиолитовый пояс; 7 — Ауэрбаховско-Новогодненский (Малоуральский) вулканоплутонический пояс; 8, 9 — зоны разломов: 8 — продольные региональные зоны разломов: а) Главный Уральский глубинный разлом (1), Главный Западно-Уральский разлом (2), б) прочие; 9 — поперечные глубинные зоны разломов: Себета-Щучинская (I), Гнетью-Немурганская (II), Лонготско-Бадьяшорская (III), Ханмейская (IV), Тышорская (V); 10 — рудно-россыпные узлы: Сибилейский (I), Юнъягинский (II), Топугол-Ханмейшорский (III), Лекынтальбейский (IV), Манитаньрдский (V), Манюкюуский (VI), Хараматалоуский (VII); 11 — золоторудные месторождения (а) и проявления (б); 12 — россыпи золота; 13, 14 — железные дороги: 13 — действующие, 14 — строящиеся и проектируемые

Fig. 1. Overview scheme of ore districts and gold mineralization of the Polar Urals (compiled using E.V. Chernyaev's data, «NPO Geosphere»). **Legend:** 1–7 — main tectonic elements of the Polar Urals: 1 — Western-Siberian plate; 2 — Preuralian foredeep; 3 — Western Uralian megazone; 4 — Central Uralian megazone; 5–7 — Tagilmegazone: 5 — Voykarskaya (1), Shchuchinskaya (2) zones; 6 — Voykarsko-Shchuchinskii ophiolitic belt; 7 — Auerbachovsko-Novogodnenskiy (Maloural'skiy) volcano-plutonic belt; 8–9 — fault zones: 8 — longitudinal regional fault zones: a) Main Uralian deep fault (1), West-Uralian Main fault (2), b) other faults; 9 — transversal deep fault zones: Sebeta-Shchuchinskaya (I), Gnet'yu-Nemuryuganskaya (II), Longotsko-Bad'yashorskaya (III), Khanmeyskaya (IV), Tyshorskaya (V); 10 — ore and placer clusters: Sibileyskiy (I), Yun'yaginskiy (II), Toupugol-Khanmeyshorskiy (III), Lekyntal'beyskiy (IV), Manitanyrdskiy (V), Manyukuyuskiy (VI), Kharamatalouskiy (VII); 11 — gold deposits (a) and occurrences (b); 12 — gold placers; 13–14 — railways: functioning (13) and ones under construction and projecting (14)

Поскольку золотопорфировый тип был обособлен сравнительно недавно в составе довольно многочисленного и разнообразного порфирового семейства, включающего месторождения Cu, Mo, W, Sn [5, 17, 36], принципы его выделения и правомерность рассмотрения в качестве самостоятельного дискутируются в литературе.

Ряд территорий Полярного Урала в течение последних лет охвачен геолого-съёмочными работами (ГДП-200), в рамках которых проводятся геохимические и изотопно-геохимические исследования интрузивных и стратифицированных комплексов [8, 13, 26, 27], включая потенциально рудоносные. В связи с этим уточнение геологической позиции золотого оруденения территории в целях прогнозирования новых металлогенических площадей и оценки выявленных проявлений является особенно актуальным.

Методика

Геологическое строение, состав вмещающих пород и околорудных метасоматитов, морфология минерализованных зон и рудных тел Петропавловского месторождения изучались авторами при документации керна разведочных скважин в 2007–2012 гг., геолого-структурном картировании полотна карьеров-расчисток (2009–2013 гг.) [4, 6, 19, 20]. В ходе исследований были детально изучены геолого-структурные особенности и морфология минерализованных зон и рудных тел. Выполнена увязка рудных пересечений по серии разрезов (по сети разведочных скважин 20 × 40 м), а также детально исследованного самого крупного карьера-расчистки Т-309 (100 × 60 м), вскрывшего наиболее богатую золоторудную минерализацию в северной части месторождения (расчистки Т-308 и Т-310 документировались и опробова-



лись фрагментами). Увязка разрезов позволила составить план поверхности, погоризонтные планы и продольный разрез месторождения масштаба 1:2000 с распределением концентраций золота. В работе учтены лабораторные анализы (петрографический, минераграфический, петрогеохимический, изотопный, микрорентгеноспектральный) для месторождений Петропавловское и Новогоднее-Монто, а также пород района, проводимые вплоть до настоящего времени. Геологические исследования выполнены в основном сотрудниками ЦНИГРИ, а лабораторно-аналитические исследования — в ЦНИГРИ, ИМГРЭ и ИГЕМ РАН.

Позиция рудного поля

Изученная часть Малоуральского ВПП в среднем палеозое (O_3-C_1) представляла собой островную дугу, сформировавшуюся на гетерогенном основании [27, 32]. Северная и западная части Войкарской зоны представлены офиолитовыми габбро-гипербазитовыми массивами — Войкар-Сыньинским и Рай-Из, которые с юга и востока окаймлены полосой габбро-амфиболитов. Восточнее расположены ордовикско-девонские островодужные плутонические и осадочно-вулканогенные комплексы, объединенные в Малоуральскую подзону (рис. 1). В пределах этой подзоны (восточнее габбро-амфиболитов) выходят на поверхность вулканогенные толщи позднеордовикско-среднедевонского возраста с подчиненными, обычно маломощными прослоями осадочных пород, прорванные ассоциирующими с ними интрузиями широкого спектра составов — от габбро до гранитоидов [7, 15]. Эти вулканогенные образования относят к палеозойской островодужной системе Полярного Урала. В эйфеле и вплоть до пермской коллизии с Восточно-Европейским континентом надсубдукционная система Полярного Урала развивалась, скорее всего, как зрелая островная дуга [27].

Рассматриваемый рудный район сложен вулканогенно-осадочными сериями, которые служат кровлей среднепалеозойского многофазного габбро-кварцево-диорит-тоналитового батолитоподобного плутона, относимого к собскому комплексу, и локализованы в области пересечения долгоживущих региональных тектонических зон [11, 12, 21, 31].

Новогодненское рудное поле приурочено к контакту вулканотерригенной тоупугольской толщи (S_2-D_1) базальт-андезиобазальтовой формации и диоритоидов собского комплекса (D_{1-2}). В рудном поле известны два близкорасположенных месторождения — крупное золоторудное Петропавловское (~ 26 т Au) и среднее Au-Fe Новогоднее-Монто, связываемые с магматическими телами собского и конгорского комплексов соответственно [19, 37]. Рудное поле ($S \sim 8 \text{ км}^2$) представляет собой локальное вулканотектоническое поднятие, к востоку переходящее в асимметричную вулканотектоническую депрессию, и локализовано в области пересечения зон разрывов субмеридионального, северо-западного и северо-восточного простираний, которые ограничивают рудное поле (рис. 2). Этими же системами нарушений контролируется позиция золоторудных месторождений Петропавловское и Новогоднее-Монто, а также нескольких рудопроявлений (Западное, Караченцева, Карьерное).

U—Pb-возраст цирконов из диоритов месторождения Петропавловское — (410 ± 2) млн лет [26], что близко

соответствует полученной [33] Rb/Sr-датировке для собского комплекса в районе месторождения — (400 ± 10) млн лет (D_{1ems}). Там же опубликованы изотопные Rb/Sr-возраста для поздних даек монцодиоритовых порфиров конгорского комплекса (382 ± 10) млн лет, D_{3fr} и рудного кварц-кальцит-серицит-хлоритового метасоматита (360 ± 1) млн лет, D_{3fm} . U—Pb-возраст цирконов из послерудных габбро-долеритов и лампрофиров месторождения Новогоднее-Монто — (256 ± 5) млн лет и (248 ± 7) млн лет соответственно [26].

Геологическое строение месторождения

Вмещающие вулканические серии формировались в островодужном режиме в два вулканических импульса. С первым связано накопление отложений базальт-андезиобазальтовой формации и ассоциирующих с ними рудовмещающих вулканогенно-терригенно-карбонатных отложений тоупугольской толщи (S_2-D_{1tp}), со вторым — образование базальт-андезитовой и трахибазальт-андезитовой формаций тоупугольегартской толщи (D_{1-2tg}). Эти породы прорваны интрузивами собского комплекса (D_{1-2s}), образующими крупные многофазные плутоны с серией поздних даек «пестрого» состава. Геологическая позиция Петропавловского месторождения определяется его локализацией в зоне контакта одного из таких массивов с вмещающими дислоцированными породами тоупугольской толщи (рис. 3). Тектоническая зона субмеридионального простирания контролирует размещение апофиз основного массива, сложенных порфировидными диоритами, а также маломощных плитообразных даек кварцевых диоритовых порфиров поздней фазы собского комплекса. К этой субмеридиональной зоне приурочены крупные поля гидротермально измененных пород, в основном вмещающих золотую минерализацию месторождения.

Первая фаза внедрения собского габбро-кварцево-диорит-тоналитового комплекса представлена крупным массивом габбро, выходящим на дневную поверхность в южной части Тоупугол-Ханмейшорского рудного узла.

Интрузивные образования на месторождении представлены преимущественно породами второй (главной) фазы внедрения собского комплекса: мелко-, среднезернистыми диоритами и их кварцсодержащими и кварцевыми разновидностями, порфировидными в краевых частях интрузивов. В подчиненном количестве присутствуют габбро-диориты и тоналиты. По содержанию кварца интрузивные породы подразделяются на габбро-диориты, диориты (до 5–6 % кварца), кварцсодержащие диориты (6–10 %) и кварцевые диорит-гранодиориты (от 10 до 20 % кварца) [21, 30]. Восточная часть этого массива характеризуется широким развитием порфировидных пород, образующих отдельные дайкообразные апофизы субмеридионального простирания и Ю-ЮВ-склонения ($65-80^\circ$) в центральной части месторождения. Их мощность составляет 10–60 м, протяженность — до 300 м (рис. 4).

Поздняя, третья фаза внедрения собского комплекса представлена дайковыми телами диоритовых и кварцевых диоритовых порфиров. Они сгущаются в приконтактной зоне Собского массива, прорывая как интрузивные образования второй фазы внедрения собского комплекса, так и отложения вулканогенно-осадочной толщи. Дайковые тела имеют субмеридиональную ориентировку, крутое ($70-80^\circ$) Ю-ЮВ-падение. Мощность

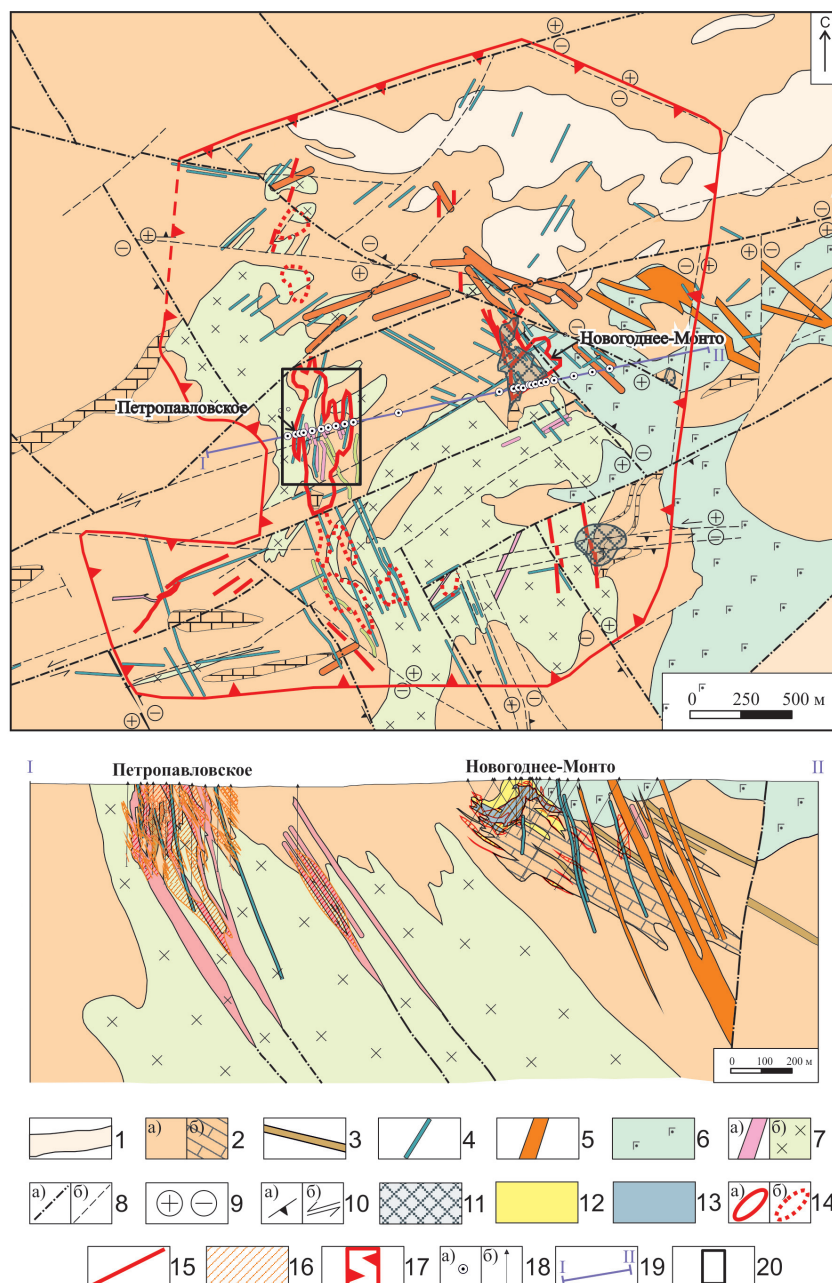


Рис. 2. Геологическая карта Новогодненского рудного поля и геологический разрез по линии I–II (составлено с использованием данных А. Г. Волчкова и др. (ЦНИГРИ), ОАО «Ямалзолото», 2008). **Условные обозначения:** 1–3 — стратифицированные образования: 1 — тоупугольгартская толща ($D_{1-2}tg$): известняки, алевролиты, аргиллиты, песчаники; 2, 3 — тоупугольская толща (S_2-D_1tp): 2 — вулканогенно-осадочные и вулканические породы андезибазальтового состава (а), известняки мраморизованные (б), 3 — андезибазальты (на разрезе); 4–7 — интрузивные образования: 4 — малоханмейский габбро-долеритовый комплекс (D_3-Tm): дайки микрогаббро; 5, 6 — конгорский габбро-монцитонитовый комплекс (D_3-C_k): 5 — монцодиориты, 6 — микрогаббро; 7 — собский габбро-диорит-плагиогранодиоритовый комплекс ($D_{1-2}s$): а) 3-я фаза внедрения: кварцевые диоритовые порфиры, плагиогранит-порфиры, б) 2-я фаза внедрения: габбро-диориты, кварцевые диориты порфировидные; 8 — разрывные нарушения: а) главные, б) второстепенные; 9 — направления падения сместителей разрывных нарушений; 10 — относительные смещения по разрывным нарушениям: а) вертикальные, б) горизонтальные; 11–13 — рудно-метасоматические образования: 11 — скарны эпидот-гранат-пироксеновые с золото-сульфидно-магнетитовой минерализацией (проекция на поверхность); 12 — эпидот-гранат-пироксеновые скарны (на разрезе); 13 — магнетитовые тела (на разрезе); 14 — штокверкоподобные золоторудные зоны: а) месторождений Петропавловское и Новогоднее-Монто, б) северного и южного флангов Петропавловского месторождения (прогнозируемые); 15 — основные линейные золоторудные жильные-прожилковые зоны жильного типа (в том числе прогнозируемые); 16 — зоны золотосульфидной минерализации; 17 — контур Новогодненского рудного поля; 18 — буровые скважины: а) на плане, б) на разрезе; 19 — линия разреза; 20 — контур рис. 3

тел достигает первых десятков метров, протяженность — до 150 м (рис. 4). В центральной части месторождения порфиры формируют пояс дайковых тел субмеридионального простирания с суммарной мощностью отдельных даек до 200 м. Дайки порфиров третьей фазы внедрения собского комплекса установлены впервые работами ЦНИГРИ (Волчков и др., 2008ф) [19]. Тела порфировых диоритов являются важнейшим рудоконтролирующим элементом Петропавловского золоторудного месторождения.

Рудовмещающая тоупугольская толща представлена переслаивающимися интенсивно дислоцированными вулканогенно-осадочными породами алевропелитовой, песчанистой и гравийной размерности. По данным бурения, мощность толщ составляет более 400 м. Для центральной части месторождения характерно крутое ($50-60^\circ$) падение пород на восток, для северной — моноклиальное залегание с Ю-ЮВ-падением. Рудовмещающая толща месторождения, прорванная дайковыми телами порфировидных диоритов и кварцевых диоритовых пор-

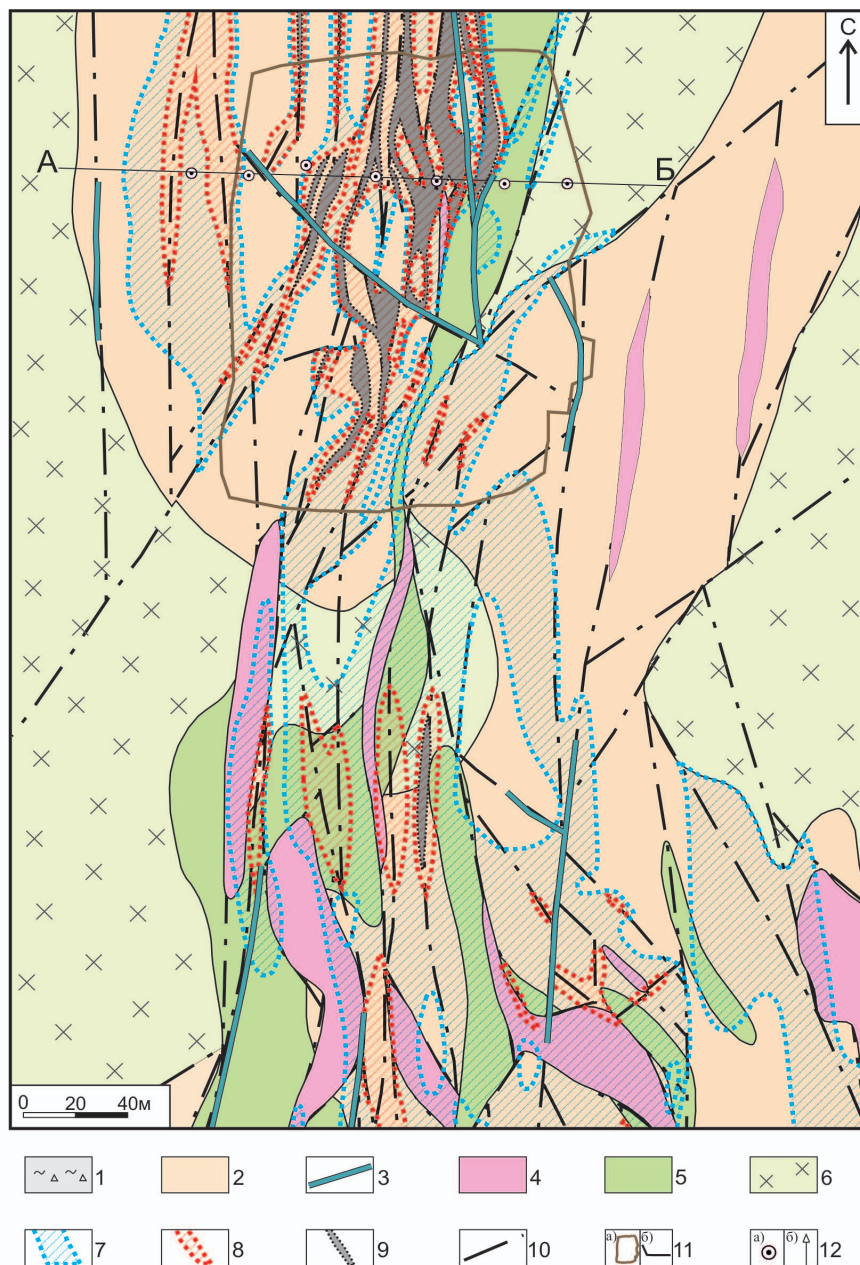


Рис. 3. Геолого-структурная схема центральной части Петропавловского золоторудного месторождения с распределением концентраций золота (с использованием данных опробования ОАО «Ямалзолото»). **Условные обозначения:** 1, 2 — стратифицированные образования: 1 — четвертичные отложения, 2 — вулканогенно-осадочные и вулканогенные породы андезибазальтового состава тоупугольской толщи (S_2-D_1tp); 3–6 — интрузивные образования: 3 — дайки микрогаббро-малокханмейского габбро-долеритового комплекса (D_3-Tm); 4–6 — собский габбро-диорит-плагиогранодиоритовый комплекс (D_{1-2s}): 4 — 3-я фаза внедрения: кварцевые диоритовые порфиры; 5, 6 — 2-я фаза внедрения: 5 — кварцевые диориты порфирические, 6 — диориты мелко-, среднезернистые; 7–9 — золоторудная минерализация: 7 — минерализованные зоны, 8 — рудные тела, 9 — «стержневые» зоны наиболее высоких концентраций золота; 10 — разрывные нарушения; 11 — контур карьера-расчистки Т-309: а) на плане, б) на разрезе; 12 — скважины колонкового бурения: а) на плане, б) на разрезе

Fig. 3. Geological and structural scheme with gold content distribution for the central part of the Petropavlovskoe gold deposit (using data of sampling of Yamalzoloto). **Legend:** 1, 2 — stratified series: 1 — quaternary sediments, 2 — volcano-sedimentary and volcanic rocks of andesibasalt composition of Toupuogol'skaya series (S_2-D_1tp); 3–6 — intrusive bodies: 3 — microgabbro dykes of the malokhanmeyskiy gabbro-dolerite complex (D_3-Tm); 4–6 — sobskiy gabbro-diorite-plagiogranite-diorite complex (D_{1-2s}): 4 — quartz diorite of the third phase; 5, 6 — second phase: 5 — quartz diorite porphyry, 6 — fine- and medium-grained diorite; 7–9 — gold mineralization: 7 — gold-bearing zones, 8 — ore bodies, 9 — «core» zones of the highest gold contents; 10 — faults; 11 — contour of the quarry-stripping T-309: a) on the plan, b) on the cross-section; 12 — drilling holes: a) on the plan, b) on the cross-section

фириков, отличается интенсивной разрывной тектоникой, фиксирующейся в керне скважин и полотно расчисток. Толща вмещает многочисленные кулисообразно построенные зоны рассланцевания и трещиноватости, контролирующие положение золоторудной минерализации.

Околорудные гидротермально-метасоматические изменения пород на месторождении проявлены в следующей последовательности: 1) ранняя (эпидот)-карбонат-хлоритовая стадия; 2) главная продуктивная пирит-(хлорит)-альбитовая; 3) поздняя продуктивная пирит-серицит-кварцевая.

Наиболее ранние (эпидот)-карбонат-хлоритовые преобразования (пропилиты) распространены практически повсеместно и образуют зоны суммарной мощностью до 300 м и более, протяженностью более 800 м. Изменения прослежены на глубине свыше 300 м, где в некоторых случаях наблюдается переход пропилитов в эпидозиты и магнетит-гранатовые скарны. Пропилитизации подверглись в основном породы вулканогенно-осадочной толщи, в меньшей степени изменены гранитоиды собского комплекса. При низком содержании сульфидов

(менее 1 %) концентрации золота в пропилитах редко превышают 0.1 г/т. Преобразования этого типа формируют внешний околорудный ореол месторождения.

Определяющие золотоносность руд месторождения *пирит-(хлорит)-альбитовые* метасоматиты главной продуктивной стадии образуют разобщенные тела неправильной формы, развитые в основном в вулканогенно-осадочной толще, и тяготеют к контактам даек порфировых диоритов [21]. Метасоматиты образуют мощную (до 150 м в центральной и 200 м в северной части месторождения) протяженную (650–700 м) зону сложной морфологии. В их составе преобладают новообразованный альбит (от первых десятков до 50–70, изредка до 90–95 %), хлорит (до 15–20 %) и пирит (5–10 % и более). Интервалы с повышенными содержаниями золота приурочены к зонам существенно альбитового метасоматоза (55 % новообразованного альбита и более), сопровождающегося интенсивной сульфидизацией (10–15 %, до 40–45 %). Руды пирит-альбитового состава нередко имеют массивный облик, свойственный колчеданным рудам.

Пирит-серицит-кварцевые метасоматиты являются наиболее поздними продуктивными гидротермаль-

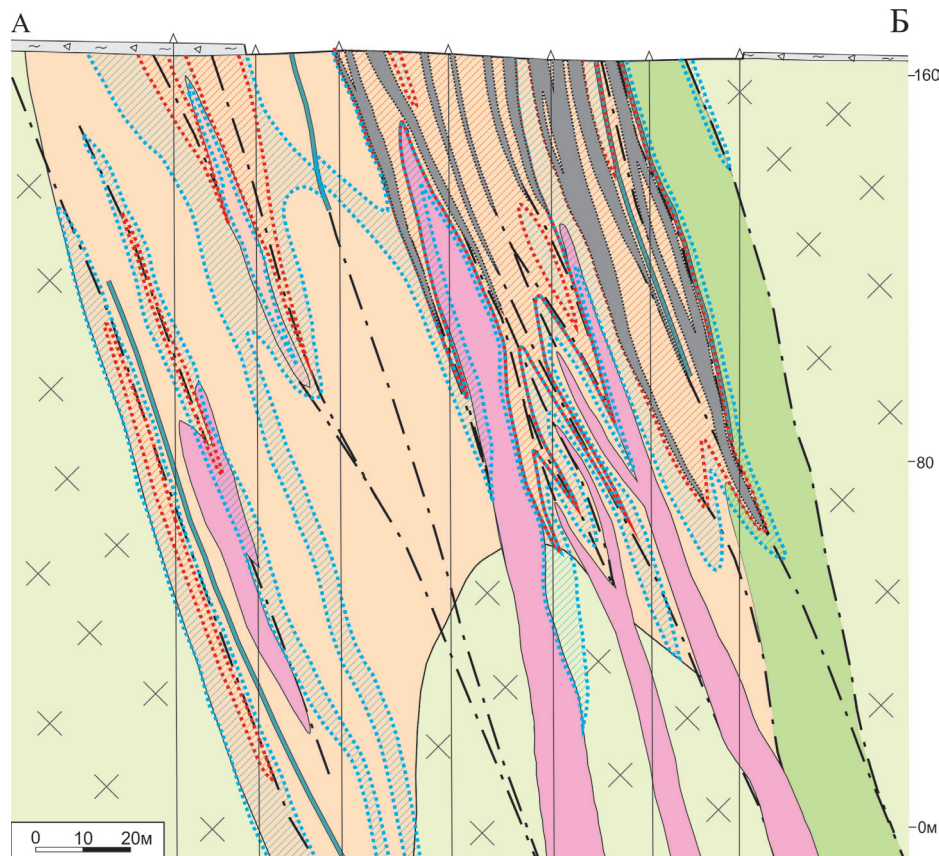


Рис. 4. Геологический разрез с распределением концентраций золота по линии А–Б. Условные обозначения см. на рис. 3

Fig. 4. Geological cross-section with gold content distribution (line A–B). The legend see on fig. 3

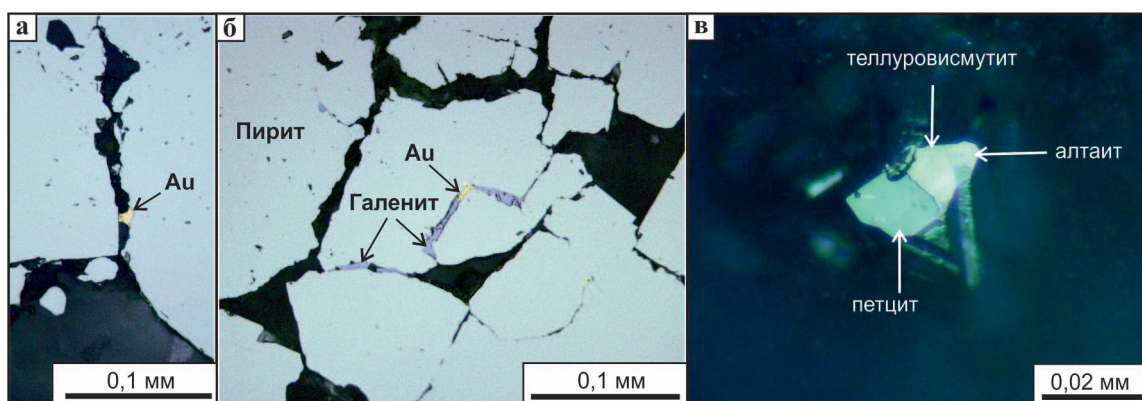


Рис. 5. Золотомалосульфидно-кварцевые руды (фото шлифов). Условные обозначения: а) золото в кварцевом прожилке в пирите, б) золото в галенистовом прожилке в пирите, в) сросток петцита, теллуrowисмутита и алтаита в кварце

Fig. 5. Gold-low sulphide-quartz ores (photo of polished sections). **Legend:** a) gold in quartz veinlet cross-cutting pyrite, b) gold in galena veinlet into pyrite, c) intergrowth of petzite, tellurobismuthite and altaite in quartz

но-метасоматическими образованиями, формирующими золотосодержащие жилы и жильно-прожилковые зоны месторождения. Эти метасоматиты включают субмеридиональные линейные тела жильно-прожилковой минерализации с наиболее высокими содержаниями золота, накладываясь как на пирит-альбитовые изменения, так и на пропилиты. Мощность тел варьирует, как правило, от десятков сантиметров до 3–5 и более метров, протяженность достигает десятков метров [19].

Типы руд Петропавловского месторождения

С областями развития описанных березитоподобных метасоматических изменений сопряжены рудные тела. По минералого-геохимическим характеристикам и структурно-морфологическим особенностям на месторождении выделяются два типа руд: 1) прожилково-вкрапленные золотосульфидные руды в пирит-альбитовых метасоматитах; 2) жильно-прожилковые золотомалосульфидно-кварцевые

руды в пирит-серцит-кварцевых метасоматитах. По объему второй тип значительно уступает первому.

Главным рудным минералом золотосульфидных руд является пирит. Его содержание в рудных интервалах варьирует от 3–5 до 15–20 % и более. Пирит представлен рассеянной вкрапленностью, просечками, гнездами и маломощными прожилками. Содержания золота в прожилково-вкрапленном пирите составляют в среднем 25–30 г/т. Помимо пирита присутствуют халькопирит, пирротин и — в основном в виде микровключений в пирите — самородное золото. Спорадически, чаще на глубоких горизонтах, встречается магнетит. Среднее содержание золота в золотосульфидных рудах обычно не превышает 1.5–2 г/т.

Золотомалосульфидно-кварцевые руды слагают секущие крутопадающие зоны малосульфидных кварцевых жил и прожилков, которые при интерполяции рудных подсечений оконтурены в виде линзовидных рудных

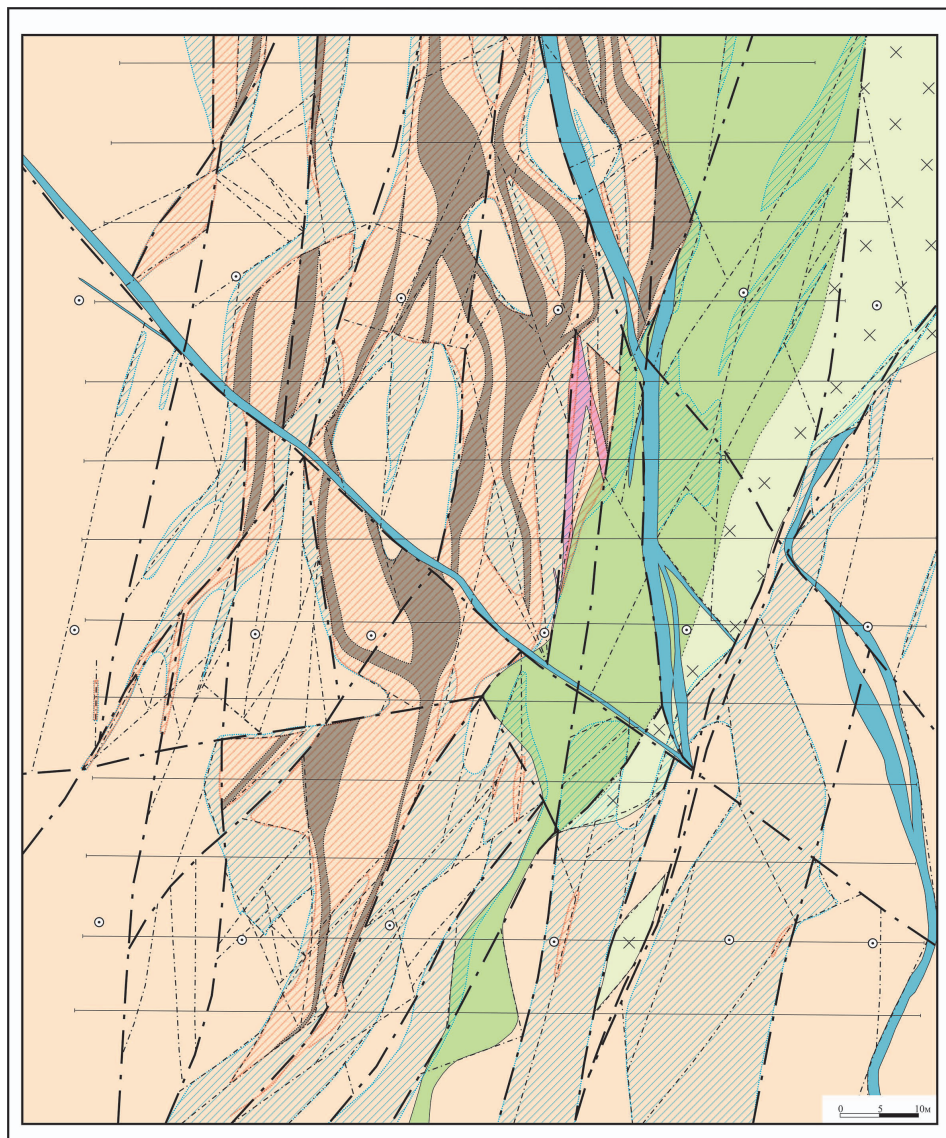


Рис. 6. Геолого-структурная схема карьера-расчистки Т-309 с распределением концентраций золота (с использованием данных опробования ОАО «Ямалзолото»). **Условные обозначения:** 1 — вулканогенно-осадочные и вулканические породы андезибазальтового состава тоупугольской толщи (S_2-D_1tp); 2–5 — интрузивные образования: 2 — дайки микрогаббро-малокханмейского габбро-долеритового комплекса (D_3-Tm); 3–5 — собский габбро-диорит-плагиогранодиоритовый комплекс ($D_{1-2}s$); 3 — 3-я фаза внедрения: кварцевые диоритовые порфиры; 4, 5 — 2-я фаза внедрения: 4 — кварцевые диориты порфировидные, 5 — диориты мелко-, среднерельефные; 6 — разрывные нарушения: а) основные, б) второстепенные; 7 — линии профилей детальной документации (а) и скважины колонкового бурения (б); 8 — золоторудная минерализация: а) минерализованные зоны, б) рудные тела, в) «стержневые» зоны наиболее высоких концентраций золота

Fig. 6. Geological and structural scheme with gold content distribution for the quarry-stripping T-309 (using data of sampling of Yamalzoloto). **Legend:** 1 — volcano-sedimentary and volcanic rocks of andesibasalt composition of Touputol'skaya series (S_2-D_1tp); 2–5 — intrusive bodies: 2 — microgabbro dykes of the malokhanmeyskiy gabbro-dolerite complex (D_3-Tm); 3–5 — sobskiy gabbro-diorite-plagiogranite-diorite complex ($D_{1-2}s$); 3 — quartz diorite of the third phase; 4–5 — second phase: 4 — quartz diorite porphyry, 5 — fine- and medium-grained diorite; 6 — faults: a) main, b) minor; 7 — lines of geological cross-sections of detailed documentation (a) and drilling holes (b); 8 — gold mineralization: a) gold-bearing zones, b) ore bodies, c) «core» zones of the highest gold contents

тел. Эти зоны вмещаются позднепродуктивными пирит-серпичит-кварцевыми метасоматитами. Количество рудных минералов в жильно-прожилковых зонах не превышает 1–1.5 %. Основным рудным минералом является пирит, в подчиненном количестве присутствуют галенит и халькопирит, реже в виде микронных и субмикронных выделений встречаются гессит, самородное золото, теллуросмугит, алтаит, Au-Ag-теллуриды — петцит, в единичных зернах — силванит и калаверит [3] (рис. 5). Жильно-прожилковые образования, накладываясь на более ранние продуктивные изменения, характеризуются высокими (5–10 г/т) средними содержаниями золота, образуя зоны наиболее богатых руд.

Строение золоторудных минерализованных зон

В результате документации расчисток и скважин, увязки рудных интервалов поверхности и на погориз-

зонтных планах, в поперечных и продольном сечениях, с учетом проведенных минералого-геохимических исследований удалось выявить основные закономерности морфологии и строения минерализованных зон и рудных тел месторождения [20]. Установлено, что золоторудная минерализация локализуется в экзо-, эндоконтактовой области штокообразного выступа массива диоритов собского комплекса, над его апикальной частью и над участками пологого погружения его кровли, осложненной серией субмеридиональных и субширотных гребневидных выступов, сопровождающихся флексуобразными приразломными складками во вмещающей толще. Минерализованные зоны и рудные тела месторождения пространственно ассоциируют с поясами дайкообразных тел порфировидных диоритов и кварцевых диоритовых порфиритов (рис. 6).

В центральной части месторождения главная минерализованная зона имеет линзовидную в попереч-



ном разрезе форму и представляет собой серию слившихся кулис. Зона прослежена по простиранию в субмеридиональном направлении на расстояние более 650 м. Мощность зоны — от первых десятков метров до 150–200 м, зона имеет крутое падение (60–70°) в восточных румбах. По результатам построения продольного разреза месторождения установлено, что минерализованная зона характеризуется сложным линейно-концентрическим штокверкоподобным строением, выходит на поверхность в северной части месторождения и относительно полого (~ 45°) погружается в южном направлении. Существенная часть рудной минерализации приурочена к вулканогенно-осадочной толще и к пространству между пластинообразными телами порфировидных диоритов и кварцевых диоритовых порфиринов, широко захватывая эндоконтактовые части этих тел на глубину первых десятков метров.

Рудные тела представлены крупнообъемными линзообразными и линейными штокверкоподобными морфоструктурами. Они тяготеют к экзоконтактовым частям дайкообразных тел порфировидных диоритов и кварцевых диоритовых порфиринов. Мощность рудных тел достигает первых десятков метров, протяженность по падению — от первых десятков до первых сотен метров. Падение рудных залежей в целом аналогично падению контактов интрузивных тел и составляет 50–70° на восток. Установлено, что разобщенные рудные тела в центральной части месторождения образуют субизометричное «ядро» суммарной мощностью до 100 м и длиной по падению 130 м и более.

Маломощные «стержневые» зоны с наиболее высокими содержаниями золота (> 5 г/т) в пределах рудных тел локализуются главным образом в лежащем боку последних. Мощность этих линейных субмеридиональных зон составляет 1–2, реже 3–5 м, протяженность — от первых метров до первых десятков метров. Интервалы высоких концентраций золота сопряжены с зонами развития наложенной золотомасульфидно-кварцевой жильно-прожилковой минерализации в пирит-серицит-кварцевых метасоматитах.

Главная минерализованная зона имеет мощность 40–140 м и прослежена по простиранию в субмеридиональном направлении более чем на 650 м, а по глубине — до 320 м и более. Рудные тела имеют мощность от 10 до 60 м, протяженность отдельных тел составляет 60–160 м (центральное «ядро» — до 350–400 м), по падению они прослеживаются на 80–120 м и более. Часто образуют серию сближенных продольных кулис, конформных минерализованной зоне. Средние содержания Au в рудных телах составляют 1.9–2.4 г/т.

По данным ИМГРЭ [21, 29] контур месторождения отвечает ореолу крупной комплексной аномалии Au (2–300 мг/т) и его элементов-спутников — Cu (50–100 мг/т), Mo (1500–4000 мг/т), Ag (60–1000 мг/т), Hg (40–97 мг/т), а также В, Pb, W, Ba и других элементов. Аномальные концентрации Au образуют крупный ореол в осевой части данной комплексной аномалии и серию мелких сателлитных ореолов и точечных аномалий на его флангах и периферии. Основными элементами-спутниками золота в первичных ореолах и рудах являются Ag, W, Mo, Cu, Zn, Pb, Ti, Y, Sn, Zr. Элементы выноса и перераспределения представлены Ni, Cr, Sr, V, Sc [25, 29]. Золото характеризуется высокой положительной корреляцией не только с серебром, но и с вольфрамом [29].

Обсуждение результатов исследований

В Тоупугол-Ханмейшорском рудном районе может быть реконструировано три этапа рудообразования. Первый этап характеризовался образованием железных руд и золотоносных колчеданов [29]. На втором этапе происходило преобразование части оруденения первого этапа, формирование скарнов и сульфидно-магнетитовых залежей с промышленным содержанием золота, а также образовались золотопорфировые крупнообъемные штокверки, связанные с заключительной фазой формирования диоритов собского комплекса. На третьем этапе в результате гидротермально-метасоматических преобразований формировались наложенные секущие зоны прожилково-вкрапленного золотосульфидно-кварцевого оруденения.

Минерализованные зоны Петропавловского месторождения представляют собой крупнообъемные линейно-штокверкоподобные тела прожилково-вкрапленных руд. В осевых частях последних локализуются стержневые линейные жильно-прожилковые рудные тела. На флангах штокверка, вне центральной части месторождения, установлена жильная золото-полиметалльно-кварцевая минерализация. Руды месторождения могут быть отнесены к золото-кварц-сульфидному рудно-формационному (геолого-промышленному) типу.

Для месторождения устанавливается ряд элементов, характерных для объектов «порфирового» типа [1, 5, 16, 17, 35, 36]:

- пространственная ассоциация рудных тел с порфировыми диоритами собского комплекса поздней фазы внедрения;
- штокверковый характер минерализации;
- наличие рудно-метасоматической зональности с телескопированием ранних относительно высокотемпературных карбонат-хлоритовых и пирит-альбитовых метасоматитов и наложенных кварц-серицитовых метасоматитов;
- объемный характер картины распределения рудных концентраций.

Изотопно-геохимические исследования рудно-магматической системы месторождения, выполненные С. Г. Кряжевым (ЦНИГРИ), показали, что рудоотложение происходило из существенно магматического флюида, на что указывает резкий пик изотопного состава серы пирита в области метеоритного стандарта (~ 85 % всех анализов — в интервале $\delta^{34}\text{S}$ от –3 до +1 ‰), на фоне снижения температуры от 300–400 °С — золотосульфидные, до 150 °С — золотосульфидно-кварцевые руды (Волчков и др., 2008ф) [37].

В качестве объектов-аналогов Петропавловского месторождения могут рассматриваться месторождения золотопорфирового типа. По классификации золоторудных месторождений ЦНИГРИ такие объекты относятся к золотопорфировой субформации золотосульфидно-кварцевой формации [1]. Крупнообъемные месторождения золотопорфирового типа, характеризующиеся невысокими содержаниями золота, в последнее время стали объектом промышленной эксплуатации как за рубежом, так и в России. Месторождения данного типа представлены золотоносными штокверками в гранитоидных штоках (Васильковское в Сев. Казахстане, Форт-Нокс в США), жилами и линейными зонами прожилкования в апикальных зонах гранитоидных штоков (Юбилейное в Зап. Казахстане, Школьное в Магаданской обл.), а так-



же в надвпрызливной зоне (Бревери Крик в Канаде, Пого и РайанЛод в США) [17, 28] и в штоках диоритовидов (глубокие горизонты Березняковского месторождения, Челябинская обл.).

Выводы

Петропавловское месторождение является примером крупнообъемного промышленного объекта с невысокими средними содержаниями золота, отнесенного к не имеющему аналога на Полярном Урале золотопорфировому типу. Правомерность такого отнесения доказывают:

- приуроченность района к структурам девонской островной дуги;
- позиция месторождения в кровле крупного батолитоидного многофазного (с преобладаем диоритов) плутона;
- пространственная ассоциация рудных тел с порфировыми субвулканическими диоритами;
- штокеркоподобная позиция золоторудной минерализации;
- объемный характер рудно-метасоматической зональности и распределения рудных компонентов;
- приуроченность интервалов с повышенными содержаниями золота к зонам существенно альбитового метасоматоза (новообразованного альбита 70 % и более), сопровождающегося интенсивной пиритизацией;
- Au-Te-W-Mo-Cu-Hg-металлогеническая специализация оруденения.

Установленные морфологические и параметрические характеристики выявленных минерализованных зон и рудных тел Петропавловского месторождения могут быть использованы при оценке новых золоторудных объектов со сходными геолого-структурными условиями локализации и типами руд.

Авторы благодарны руководству и сотрудникам ОАО «Ямалзолото» за содействие в проведении полевых работ: А. Г. Волчкову, С. Г. Кряжеву, М. М. Гирфанову, А. П. Трофимову, В. А. Душину — за помощь и полезное обсуждение; Е. Э. Тюковой, Ю. Н. Ивановой, И. Д. Соболеву — за участие в обработке каменных и аналитических материалов. Исследования проводились при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00693).

Литература

1. Беневолюский Б. И., Блинова Е. В., Бражник А. В. и др. Методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов: Золото. М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2002. 182 с.
2. Беневолюский Б. И., Волчков А. Г., Процкий А. Г. Перспективы создания рудной сырьевой базы золотодобывающей промышленности в Полярноуральском регионе // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2004. № 2. С. 10–15.
3. Викентьев И. В., Абрамова В. Д., Иванова Ю. Н. и др. Микропримеси в пирите золотопорфирового месторождения Петропавловское (Полярный Урал) по данным LA-ICP-MS // ДАН. 2016. Т. 470. № 3. С. 326–330.
4. Викентьев И. В., Мансуров Р. Х., Трофимов А. П. Золотосульфидное оруденение Полярного Урала: условия образования и связь с гранитоидным магматизмом // Гранитоиды: условия формирования и рудоносность: Тез. конф. Киев: Ин-т геохимии, минералогии и рудообразования НАНУ, 2013. С. 33–35.
5. Гирфанов М. М. Особенности рудно-метасоматической зональности как критерий масштабности медно-порфирового оруденения // Труды ЦНИГРИ. 1989. Вып. 230. С. 39–43.
6. Гирфанов М. М., Андреев А. В., Зеликсон Б. С., Мансуров Р. Х. Перспективы развития минерально-сырьевой базы золота Полярного Урала (ЯНАО) // Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений — достижения и перспективы: Мат. науч.-практ. конф. М.: ЦНИГРИ, 2008. С. 55–56.
7. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (3-е покол.). Серия Уральская. Лист Q-41 — Воркута. Объясн. зап. СПб.: Карт. фабр. ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
8. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (3-е покол.). Серия Зап.-Сибирская. Лист Q-42 — Салехард. Объясн. зап. СПб.: Карт. фабр. ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
9. Грабежеев А. И., Краснобаев А. А. U-Pb-возраст и изотопно-геохимическая характеристика Томинско-Березняковского рудного поля (Южный Урал) // Литосфера. 2009. № 2. С. 14–27.
10. Грабежеев А. И. Юбилейное Cu-Au-порфировое месторождение (Южный Урал, Россия): Shrimp-ii и Pb-возраст циркона и изотопно-геохимические особенности рудоносных гранитоидов // Доклады академии наук. 2014. Т. 454. № 3. С. 315.
11. Диденко А. Н., Куренков С. А., Руженцев С. В. Тектоническая история Полярного Урала. М.: Наука, 2001. 191 с.
12. Душин В. А. Магматизм и геодинамика палеоконтинентального сектора севера Урала. М.: Недра, 1997. 213 с.
13. Душин В. А., Малюгин А. А., Козьмин В. С. и др. Некоторые особенности размещения благороднометалльного оруденения в пределах Уральского Севера // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 8. С. 34–41.
14. Золоев К. К. Современное состояние металлогении подвижных поясов: механизм формирования, особенности рудообразования // Геология и металлогения Урала: Мат. научн. конф. Екатеринбург: ОАО УГСЭ, 1998. С. 61–68.
15. Кениг В. В., Бутаков К. В. Месторождения рудного золота Новогоднее-Монто и Петропавловское — новый золоторудный район на Полярном Урале // Разведка и охрана недр. 2013. № 11. С. 22–24.
16. Кривцов А. И. Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. М.: Недра, 1983. 256 с.
17. Кривцов А. И., Звездов В. С., Мигачев И. Ф. Медно-порфировые месторождения. М.: ЦНИГРИ, 2001. 232 с. (Модели месторождений благородных и цветных металлов).
18. Лючкин В. А., Толоконников А. В., Водоватов О. В. и др. Золоторудные месторождения Новогодненского рудного поля на Полярном Урале // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона: Мат. науч. конф. Сыктывкар, 2006. С. 186–189.
19. Мансуров Р. Х. Геологическое строение Петропавловского золоторудного месторождения (Полярный Урал) // Руды и металлы. 2009. № 5. С. 70–74.
20. Мансуров Р. Х. Морфологическая модель Петропавловского золоторудного месторождения (Полярный Урал) // Вестник РУДН. Сер. Инж. исслед. 2011. № 1. С. 74–78.



21. Мансуров Р. Х. Геолого-структурные условия локализации Петропавловского золоторудного месторождения (Полярный Урал). Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2013. 22 с.
22. Охотников В. Н. Геология рудных образований Полярного Урала. Л.: Наука, 1975. 175 с.
23. Плотинская О. Ю., Грознова Е. О., Коваленкер В. А. и др. Минералогия и условия образования руд Березняковского рудного поля (Южный Урал, Россия) // Геол. рудн. месторож. 2009. Т. 51. С. 414–443.
24. Сазонов В. Н., Мурзин В. В., Григорьев Н. А. Березняковское золотопорфировое месторождение (Южный Урал). Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 1994. 48 с.
25. Силаев В. И. Коренная золотоносность Полярно-уральского региона // Руды и металлы. 1998. № 5. С. 5–17.
26. Соболев И. Д., Латышев А. В., Викентьев И. В. и др. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS)-датирования цирконов и первые палеомагнитные данные из интрузивных пород месторождений Петропавловское и Новогоднее-Монто, Полярный Урал // Металлогения древних и современных океанов — 2017: От минералогенеза к месторождениям. Миасс: ИМин УрО РАН, 2017а (в печати).
27. Соболев И. Д., Соболева А. А., Удортатина О. В. и др. Первые результаты U-Pb-датирования детритных цирконов из обломочных пород Полярноуральской палеозойской палеоостровной дуги // Бюлл. МОИП. 2017б (в печати).
28. Сторожженко А. А. Юбилейное месторождение // Геология золоторудных месторождений СССР. 1984. Т. 1. С. 180–186.
29. Трофимов А. П., Фунтиков Б. В., Лючкин В. А. Прогнозно-геохимическая оценка золотоносности Новогодненской перспективной площади на Полярном Урале // Руды и металлы. 2006. № 5. С. 13–18.
30. Удортатина О. В., Кузнецов Н. Б. Собский плагиогранитоидный комплекс Полярного Урала // Бюлл. МОИП. 2007. Т. 82. Вып. 3. С. 49–59.
31. Черняев Е. В., Черняева Е. И., Седельникова А. Ю. Геология золото-скарнового месторождения Новогоднее-Монто (Полярный Урал) // Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...): Мат. науч. конф. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2005. С. 131–137.
32. Язева Р. Г., Бочкарев В. В. Войкарский вулканоплутонический пояс (Полярный Урал). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 160 с.
33. Girfanov M., Volchikov A., Kryazhev S., Novikov V. Gold-iron oxide bearing ore-magmatic system of the Auerbach-Novogodnee volcano-plutonic belt, the Polar Urals // Abs. 33rd Intern. Geol. Congr. Oslo, 2008. P. 1.
34. Shatov V. V., Seltmann R., Moon C. J. The Yubileinoe porphyry Au(-Cu) deposit, the South Urals: Geology and alteration controls of mineralization // Eliopoulos D.G. et al. (Eds.), Mineral Exploration and Sustainable Development, Proc. 7th SGA Meeting, Athens, Greece. Rotterdam: Millpress, 2003. V. 1. P. 379–382.
35. Sillitoe R. H. Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery // Gold in 2000. SEG Reviews. 2000. V. 13. P. 315–345.
36. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems // Econ. Geology. 2010. V. 105. P. 3–41.
37. Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechenskaya S. S. Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au(-Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural // Mineralium Deposita. 2013. V. 48. P. 603–625.

References

1. Benevol'skiy B. I., Blinova E. V., Brazhnik A. V. et al. *Metodicheskoe rukovodstvo po otsenke prognozny khresurov almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov. Vypusk «Zoloto»* (Methodological Guide for the evaluation of forecast resources of diamonds, precious and non-ferrous metals. Release of «Gold»). Moscow: FSUE TSNIGRI, 2002, 182 p.
2. Benevol'skiy B. I., Volchikov A. G., Prot'skiy A. G. *Perspektivy sozdaniya rudnoy syr'yevoy bazy zolotodobyvayushchey promyshlennosti v Polyarnoural'skom regione* (Prospects for ore resource base of gold mining in the Polar Urals). Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie, 2004, No. 2, pp. 10–15.
3. Vikentyev I.V., Abramova V.D., Ivanova Yu. N. et al. *Mikroprimesi v pirite zoloto-porfirovogo mestorozhdeniya Petropavlovskoe (Polyarnyy Ural) po dannym LA-ICP-MS* (Trace elements in pyrite of gold-porphyry deposit Petropavlovskoe (Polar Urals), according to the LA-ICP-MS). DAN, 2016, V. 470, No.3, pp. 326–330.
4. Vikentyev I. V., Mansurov R. Kh., Trofimov A. P. *Zoloto-sul'fidnoe orudnenie Polyarnogo Urala: usloviya obrazovaniya i svyaz' s granitoidnym magmatizmom* (Gold-sulphide mineralization of the Polar Urals: formation and relationship with granitoid magmatism). Granitoids: formation and ore mineralization. Proceeding of scientific and practical conference. Kiev: Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of NASU, 2013, pp. 33–35.
5. Girfanov M. M. *Osobennosti rudno-metasomaticheskoy zonal'nosti kak kriteriy masshtabnost imednoporfirovogo orudneniya* (Characteristics of ore-metasomatic zoning as a criterion of the measure of porphyry copper mineralization). Trudy TsNIGRI, 1989, Vyp. 230, pp. 39–43.
6. Girfanov M. M., Andreev A. V., Zelikson B. S., Mansurov R. Kh. *Perspektivy razvitiya mineral'no-syr'yevoy bazy zolota Polyarnogo Urala (YaNAO)* (Prospects of development of the mineral resource base of gold within the Polar Urals (Yamal-Nenets autonomous district)). Forecast, prospecting and evaluation of ore and non-ore deposits — achievements and prospects: Proceeding of scientific and practical conference. Moscow: FSUE TSNIGRI, 2008, pp. 55–56.
7. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii* (State geological map of Russian Federation). Scale 1:1000000 (Third gener.). The Urals series. Q-41 sheet — Vorkuta. Explanatory note. Saint-Petersburg, VSEGEI, 2007, 541 p.
8. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii* (State geological map of Russian Federation). Scale 1:1000000 (Third gener.). The Western Siberia series. Q-41 sheet — Salekhard. Explanatory note. Saint-Petersburg, VSEGEI, 2014, 396 p.
9. Grabezhev A. I., Krasnobaev A. A. *U-Pb vozrast i izotopno-geokhimicheskaya kharakteristika Tominsko-Bereznyakovskogo rudnogopolya (Yuzhnyy Ural)* (U-Pb age and isotopic-geochemical characteristics of the Tomino-Bereznyakovskoe ore field (the SouthernUrals)). Litosfera, 2009, No. 2, pp. 14–27.
10. Grabezhev A. I. *Yubileynoe Cu-Au-porfirovoe mestorozhdenie (Yuzhnyy Ural, Rossiya): Shrimp-ii u Pb-vozrast tsirkona i izotopno-geokhimicheskie osobennosti rudonosnykh granitoidov* (The Yubileynoe Cu-Au-porphyry deposit (the Southern Urals, Russia): Shrimp-ii and Pb-zircon age and isotopic-geochemical features of ore-bearing granitoids). Doklady akademii nauk, 2014, V. 454, No. 3, pp. 315.



11. Didenko A. N., Kurenkov S. A., Ruzhentsev S. V. *Tektonicheskaya istoriya Polyarnogo Urala* (Tectonic history of the Polar Urals). Moscow: Nauka, 2001, 191 p.
12. Dushin V. A. *Magmatizm i geodinamika paleo-kontinental'nogo sektora severa Urala* (Magmatism and geodynamics of the paleocontinental sector of the Northern Urals). Moscow: Nedra, 1997, 213 p.
13. Dushin V. A., Malyugin A. A., Koz'min V. S. et al. *Nekotorye osobennosti razmeshcheniya blagorodnometall'nogo orudneniya v predelakh Ural'skogo Severa* (Certain features of the placement of precious metals mineralization within the Northern Urals). *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 2013, No. 8, pp. 34–41.
14. Zoloev K. K. *Sovremennoe sostoyanie metallogeni i podviznykh poyasov: mekhanizmy formirovaniya, osobennosti rudobrazovaniya* (The current state of metallogeny of mobile belts: formation mechanism, characteristics of mineralization). *Geology and metallogeny of the Urals: Proceeding of scientific conference*. Ekaterinburg: OAO UGSE, 1998, pp. 61–68.
15. Kenig V. V., Butakov K. V. *Mestorozhdeniya rudnogo zlota Novogodnee-Monto Petropavlovskoe — novyy zolotorudnyy rayon na Polyarnom Urale* (The Novogodnee-Monto and Petropavlovskoe gold deposits — a new gold mining region in the Polar Urals). *Razvedka i okhran anedr*, 2013, No. 11, pp. 22–24.
16. Krivtsov A. I. *Geologicheskie osnov prognozirovaniya i poiska vmedno-porfirovyykh mestorozhdeniy* (Geological bases of forecasting and exploration for porphyry copper deposits). Moscow: Nedra, 1983, 256 p.
17. Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Migachev I. F. *Mednoporfirovyy emestorozhdeniya. Seriya: Modeli mestorozhdeniy blagorodnykh i tsvetnykh hmetallov* (Copper porphyry deposits. Series: Models of deposits of precious and non-ferrous metals). Moscow: FSUE TSNIGRI, 2001, 232 p.
18. Lyuchkin V. A., Tolokonnikov A. V., Vodovatov O. V. et al. *Zolotorudnye mestorozhdeniya Novogodnenskogo rudnogopolyana Polyarnom Urale* (Gold ore deposits of the Novogodnenskoe ore field within the Polar Urals). *Diamonds and precious metals of the Timan-Ural region: Proceeding of scientific conference*. Syktyvkar, 2006, pp. 186–189.
19. Mansurov R. Kh. *Geologicheskoe stroenie Petropavlovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Polyarnyy Ural)* (Geological structure of the Petropavlovskoe gold deposit (the Polar Urals)). *Rudy i metally*, 2009, No. 5, pp. 70–74.
20. Mansurov R. Kh. *Morfologicheskaya model' Petropavlovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Polyarnyy Ural)* (Morphological model of the Petropavlovskoe gold deposit (the Polar Urals)). *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya*, 2011, No. 1, pp. 74–78.
21. Mansurov R. Kh. *Geologo-strukturnyye usloviya lokalizatsii Petropavlovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Polyarnyy Ural)* (Geological and structural features of localization of the Petropavlovskoe gold deposit (the Polar Urals)). PhD thesis. Moscow, 2013, 22 p.
22. Okhotnikov V. N. *Geologiya rudnykh obrazovaniy Polyarnogo Urala* (Geology of ore formations of the Polar Urals). Leningrad: Nauka, 1975, 175 p.
23. Plotinskaya O. Yu., Groznova E. O., Kovalenker V. A. et al. *Mineralogiya i usloviya obrazovaniya rud Bereznyakovskogo rudnogo polya (Yuzhnyy Ural, Rossiya)* (Mineralogy and formation of ores of the Bereznyakovskoe ore field (Southern Urals, Russia)). *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2009, V. 51, pp. 414–443.
24. Sazonov V. N., Murzin V. V., Grigor'yev N. A. *Bereznyakovskoe zolotoporfirovoe mestorozhdenie (Yuzhnyy Ural)* (The Bereznyakovskoe gold-porphyry deposit (the South Urals)). Ekaterinburg, IGIGUrO RAN, 1994, 48 p.
25. Silaev V. I. *Korennaya zolotonosnost' Polyarnoural'skogo regiona* (Gold ore mineralization of the Polar Urals). *Rudy i metally*, 1998, No. 5, pp. 5–17.
26. Sobolev I. D., Latyshev A. V., Vikent'yev I. V. et al. *Rezultaty U-Pb (LA-ICP-MS) datirovaniya tsirkonov I pervye paleomagnitnye dannye iz intruzivnykh porod mestorozhdeniy Petropavlovskoe I Novogodnee-Monto, Polyarnyy Ural* (Results of U-Pb (LA-ICP-MS) dating of zircon and the first paleomagnetic data from intrusive rocks of the Petropavlovskoe and Novogodnee-Monto deposits, the Polar Urals). *Metallogeny of ancient and present oceans-2017: From mineralogenesis to deposits*. Miass, I Min UrO RAN, 2017a (in press).
27. Sobolev I. D., Soboleva A. A., Udoratina O. V. et al. *Pervyerezultaty U-Pb datirovaniya detritnykh tsirkonov iz oblomochnykh porod Polyarnoural'skoy paleozoyskoy paleostrovnoy dugi* (The first results of U-Pb dating of detrital zircons from the clastic rocks of the Paleozoic Polar Urals' paleoisland arc). *Byull. MOIP*, 2017 b (in press).
28. Storozhenko A. A. *Yubileynoe mestorozhdenie* (Yubileynoe ore deposit). *Geologiya zolotorudnykh mestorozhdeniy SSSR*. 1984, V. 1, pp. 180–186.
29. Trofimov A. P., Funtikov B. V., Lyuchkin V. A. *Prognozno-geokhimicheskaya otsenka zolotonosnosti Novogodnenskoy perspektivnoy ploshchadi na Polyarnom Urale* (Forecast-geochemical assessment of gold potential of the Novogodnenskaya prospective area in the Polar Urals). *Rudy i metally*, 2006, No. 5, pp. 13–18.
30. Udoratina O. V., Kuznetsov N. B. *Sobskiy plagiogranitoidnyy kompleks Polyarnogo Urala* (Sobsky plagiogranitoid complex of the Polar Urals). *Byulleten' moskovskogo obshchestva ispytateley prirody*, 2007, V. 82, Vyp. 3, pp. 49–59.
31. Chernyaev E. V., Chernyaeva E. I., Sedel'nikova A. Yu. *Geologiya zloto-skarnovogo mestorozhdeniya Novogodnee-Monto (Polyarnyy Ural)* (Geology of the Novogodnee-Monto gold-skarn deposit). The skarns, their genesis and ore mineralization (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...): *Proceeding of scientific conference*. Ekaterinburg: IGIG UrO RAN, 2005, pp. 131–137.
32. Yazeva R. G., Bochkarev V. V. *Voykarskiy vulkano-plutonicheskii poyas (Polyarnyy Ural)* (Voykarsky volcano-plutonic belt (the Polar Urals)). Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 1984, 160 p.
33. Girfanov M., Volchkov A., Kryazhev S., Novikov V. Gold-iron oxide bearing ore-magmatic system of the Auerbach-Novogodnee volcano-plutonic belt, the Polar Urals. *Abs. 33rd Intern. Geol. Congr. Oslo*, 2008, P. 1.
34. Shatov V. V., Seltmann R., Moon C. J. The Yubileinoe porphyry Au (-Cu) deposit, the South Urals: Geology and alteration controls of mineralization. *Eliopoulos D. G. et al. (Eds.), Mineral Exploration and Sustainable Development, Proc. 7th SGA Meeting, Athens, Greece. Rotterdam, Millpress*, 2003, V. 1, pp. 379–382.
35. Sillitoe R. H. Gold-Rich Porphyry Deposits: Descriptive and Genetic Models and Their Role in Exploration and Discovery. *Gold in 2000, SEG Reviews*, 2000, V. 13, pp. 315–345.
36. Sillitoe R. H. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 2010, V. 105, pp. 3–41.
37. Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechenskaya S. S. Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au-(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural. *Mineralium Deposita*, 2013, V. 48, pp. 603–625.



ОБ УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ДИАСПОРА В ПЕРВИЧНЫХ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ В КОРУНДЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУТАРА (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК РОССИИ)

С. Ю. Буравлева, О. В. Авченко, В. А. Пахомова

ДВГИ ДВО РАН, Владивосток

s_buravleva@yahoo.com

С помощью метода рамановской спектроскопии (раман-спектрометр Horiba LABRAM HR 800) впервые получены данные о составе первичных флюидных включений в корундах месторождения Сутара (Еврейская автономная область, Дальний Восток России), содержащих диаспор, который обнаружен нами во включениях корунда в качестве дочернего минерала. При помощи программы «Селектор» на основе термодинамического расчета реакции $\frac{1}{2} Al_2O_3 + \frac{1}{2} H_2O = AlOOH$ установлено, что образование

диаспора на корундовой матрице в существенно углекислом флюиде происходит при температуре 305 °С и не зависит от давления. В водно-углекислом флюиде равновесие корунд – диаспор смещается в высокотемпературную область и обнаруживает зависимость от давления. Таким образом, при известном составе водно-углекислого флюида включения диаспора в корундах могут служить своеобразным геотермометром.

Ключевые слова: корунд, первичные включения, диаспор, метаморфизм, программа «Селектор».

CONDITIONS OF FORMATION OF THE DIASPORE IN THE PRIMARY FLUID INCLUSIONS IN CORUNDUM OF THE SUTARA DEPOSIT (RUSSIAN FAR EAST)

S. Y. Buravleva, O. V. Avchenko, V. A. Pakhomova

FEFI FEB RAS, Vladivostok

The data on the composition of primary fluid inclusions in corundum of Sutara deposit were first obtained by Raman spectroscopy using a Horiba LABRAM HR 800 spectrometer. Their primary fluid inclusions contained daughter diaspore crystals, which had not been previously detected in the inclusions of Sutara corundums (Jewish Autonomous Region, Russian Far East). Using Selector software based on thermodynamic calculations reaction: $\frac{1}{2} Al_2O_3 + \frac{1}{2} H_2O = AlOOH$ we found that the formation diaspore at CO₂ fluid occurred at a temper-

ature 305 °C and did not depend on pressure. In the H₂O–CO₂ fluid, the balance of corundum — diaspore shifted in the high temperature section and detected dependence on pressure. Thus, for the known temperature and the composition of H₂O–CO₂ fluid the diaspore inclusion in corundum may serve as geothermometer.

Keywords: corundum; primary inclusions, diaspore, metamorphism, Selector software.

Введение

Изучению корундов посвящена обширная литература [10, 16, 17, 20, 22]. Диаспор в качестве дочерней фазы первичных флюидных включений известен на многих месторождениях и проявлениях корунда [11, 15, 19]. На основе экспериментальных и расчетных данных построены Р-Т-диаграммы системы «диаспор – корунд – вода» (AlO(OH)–Al₂O₃–H₂O) [12, 18], позволяющие установить параметры кристаллизации твердых фаз. Однако результаты этих экспериментов невозможно экстраполировать на природные обстановки, поскольку природные флюиды обогащены углекислотой, метаном и другими компонентами, что вызывает смещение равновесия «диаспор – корунд» в низкотемпературную область.

На примере диаспора, впервые обнаруженного нами в корундах золоторудного месторождения Сутара в качестве дочерней фазы первичных включений [8], с использованием современных методов анализа (методы термобарогеохимии, рамановской спектроскопии) делается попытка определить вероятные условия образования диаспора во включениях на основе физико-химического моделирования системы AlO(OH)–Al₂O₃–H₂O–CO₂–С. Как оказалось, флюидные включения с диаспором могут

служить своеобразным термобарометром, позволяющим восстановить историю физико-химических условий образования корунда.

Цель работы — определение условий возникновения диаспора.

Геологическая обстановка

Район золоторудного месторождения Сутара, где обнаружены корундовая россыпь и коренные проявления корунда — марундиты, находится на территории Еврейской автономной области и является частью Малохинганского террейна. Район месторождения характеризуется широким развитием раннекембрийских метаморфизованных графитоносных гнейсов, кристаллических сланцев и известняков, ордовикских интрузий двуслюдяных турмалиносодержащих лейкогранитов, средне-, позднекарбонных гранодиоритов и гранитов, слагающих Сутарский массив, даек пегматитов (рис. 1).

Марундиты — породы с содержанием корунда до 70–90 %, образуют линзы и жилы на контакте лейкогранитов (пегматитов) и кристаллических сланцев, содержащих ксенолиты карбонатных пород [2, 3, 7]. Руды содержат маргарит, диаспор, рутил, вермикулит и муско-

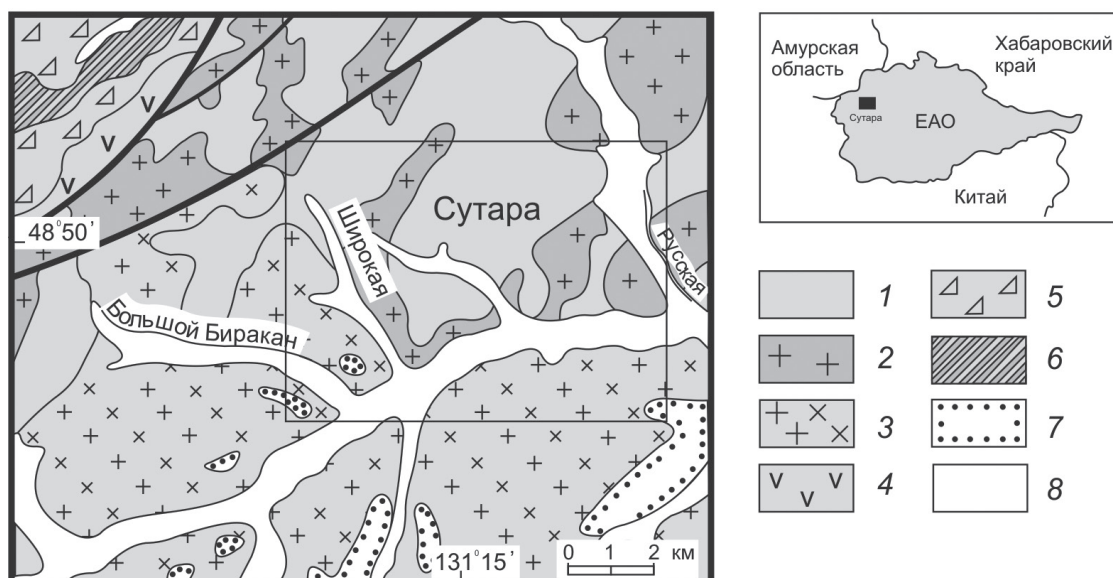


Рис. 1. Геологическая карта района исследований на основе Государственной геологической карты [4]: 1 — глинистые сланцы, песчаники и известняки (Є1km), 2 — двуслюдяные лейкограниты (Ob), 3 — гранодиориты, граниты и дайки пегматитов (C2-3t), 4 — андезиты, их лавобреккии и туфы (K1st), 5 — туфы и туффиты риолитов (K1sl), 6 — дайки игнимбритов (K2ob), 7 — пески, глины, галечники (N2–Q1bl), 8 — аллювиальные отложения (QIV)

Fig 1. Geological map of the area based on the State geological map [4]: 1 — shales, sandstones and limestones (Є1km), 2 — two-mica leucogranite (Ob), 3 — granodiorite, granite and pegmatite dykes (C2-3t), 4 — andesites, their breccias and tuffs (K1st), 5 — tuffs and tuffites of rhyolites (K1sl), 6 — dikes of ignimbrites (K2ob), 7 — sand, clay, gravel (N2–Q1bl), 8 — alluvial sediments (QIV)

вит, заполняющие промежутки между кристаллами корунда. В аллювиальных и делювиальных отложениях корунд встречается в форме дипирамидальных и ромбоэдрических кристаллов размером до 2 см.

Методы изучения флюидных включений и их состав

В результате изучения полированных пластин в корундах установлены минеральные и флюидные первичные и вторичные включения. Минеральные включения представлены рутилом, монацитом, цирконом, ксенотимом, биотитом, мусковитом, маргаритом, хлоритом, плагиоклазом, ильменитом, пиритом и шпинелью.

Зоны роста корунда пересекаются шлейфообразными скоплениями флюидных включений, возникших при заживлении трещин и, очевидно, являющихся вторичными. В их составе обычно преобладают жидкие и газовые углекислотные включения, являющиеся индикаторами метасоматических процессов, происходивших при образовании корундов.

Для микротермометрических исследований флюидных включений использовалась термокамера Linkam THMSG 600 (ЦКП ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток). В результате 45 микротермометрических опытов было установлено, что корунды содержат первичные флюидные включения, состоящие из смеси углекислоты и метана и содержащие дочернюю кристаллическую фазу. Температура плавления кристаллов метана — 117.7 °C, температура плавления последнего кристалла CO_2 — 57.5 °C. Гомогенизация включений невозможна, так как кристаллическая дочерняя фаза не реагирует на нагревание.

Дальнейшие исследования первичных включений в корундах методом рамановской спектроскопии подтвердили наличие углекислоты и метана, в отличие от корундов известных месторождений Вьетнама и Шри Ланки, где флюид первичных включений представлен почти чистой углекислотой [11, 15]. Мольное отношение углекислоты и метана составляет 0.99 и 0.01 соответственно. Значения от-

носительных рамановских сечений для CO_2 составляют 1.0 и 1.5; для CH_4 — 7.5 [9]. Волновое число линии для CO_2 составляет 1284 cm^{-1} и 1387 cm^{-1} , для CH_4 — 2914 cm^{-1} .

Дочерняя фаза во включениях представлена диаспором (рис. 2). Как и в корундах Вьетнама и Шри Ланки [11, 15], в корундах Сутары аналитическими методами вода не обнаружена, но она может присутствовать в виде тонкой пленки на стенках включений.

Диапор присутствует в качестве дочерних фаз, но не встречается в виде минеральных включений в корунде, что указывает на относительную маловодность флюида. Анализ россыпных корундов и корундов из марундитов методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС), выполненный в Институте геологии и минералогии СО РАН, также подтвердил очень низкое содержание воды в образцах.

Условия образования диаспора во включениях по данным физико-химического моделирования Постановка задачи

Для выяснения термодинамических характеристик процесса образования диаспора в корунде были построены две модели. Первая модель рассматривает образование диаспора на корундовой матрице в чисто водном флюиде с учетом результатов экспериментальных работ по системе «диапор — корунд» [12, 18]. Вторая модель ориентирована на рассмотрение условий образования диаспора в природной обстановке. Она рассчитывается с флюидом, состоящим из газовой смеси CO_2 – H_2O – CO – CH_4 .

Методика моделирования

Физико-химическое моделирование проводилось на программном комплексе «Селектор» минимизацией потенциала Гиббса. Основные принципы работы ПК «Селектор» и его возможности рассмотрены в монографиях [1, 6]. Моделирование проводилось на основе внутренне согласованной термодинамической базы [13]. Термодинамические свойства компонентов водного рас-

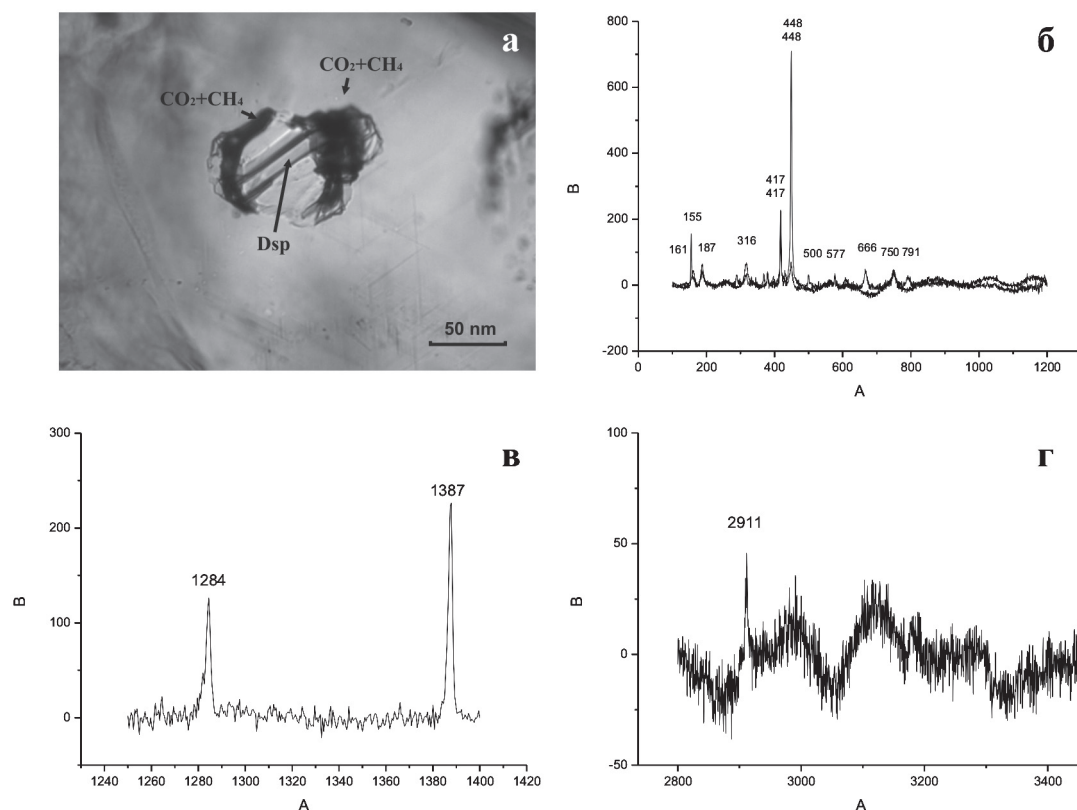


Рис. 2. Состав первичного флюидного включения в корунде: а — первичное включение. Диаспор (Dsp), смесь углекислоты и метана ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4$); б — пики диаспора; в — пики углекислоты; г — пик метана. Образец БС-293. Анализ выполнен методом рамановской спектроскопии на рамановском спектроанализаторе Horiba LABRAM HR 800 в ЦКП ДВГИ ДВО РАН, аналитик С. Ю. Буравлева

Fig. 2. The composition of the primary fluid inclusions in corundum. а — the primary inclusion. Diaspore (Dsp), a mixture of methane and carbon dioxide ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4$); б — the peaks of the Diaspore; в — carbon dioxide peaks; г — methane peak. BS-293 sample. The analysis is made by Raman spectroscopy by Raman spectrum analyzer Horiba LABRAM HR 800 in the The Primorye Shared Analytical Center for Local Elemental and Isotope Analysis FEGI FEB RAS, analyst SY Buravleva

твору учитывались по базе данных а_Sprons98, встроенной в ПК «Селектор». Индивидуальные характеристики активности ионов и нейтральных комплексов γ_i рассчитывались по модифицированному уравнению Дебая — Хьюккеля [21]. При моделировании газового флюида применялась идеальная смесь реальных газов, причем зависимость термодинамических характеристик газов от давления вычислялась по модифицированному Б. И. Ли и М. Г. Кеслером уравнению состояния Бенедикта — Вебба — Рубина [14]. Критические параметры газов взяты из базы RPS [5]. Согласно принятой модели, рассчитывается фугитивность реальных газов, но взаимодействие газов между собой не учитывается. Эта модель газового флюида вполне рациональна в области не слишком высоких давлений и обычна в петрологических и экспериментальных работах [6].

Результаты моделирования

Первая задача. Система «диаспор — корунд — вода»

Модель состояла из двух резервуаров. В первый резервуар помещалось 10 молей воды, которая в процессе моделирования переходила во второй резервуар, где находился Al_2O_3 в количестве 0.01 моля. Во втором резервуаре при заданных температуре и давлении проходила

реакция: $\frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} = \text{AlOOH}$. Положение линии

равновесия «диаспор — корунд» по расчетным данным показано на рис. 3 (сплошная линия), причем сопоставление расчетных температур с экспериментальными (при заданном давлении) показывает хорошую сходимость (табл. 1). Расчеты также показывают, что комплексы алюминия присутствуют в водном растворе в исчезающе

Таблица 1. Сопоставление расчетных температур равновесия диаспор/корунд с экспериментальными [12] в чистом водном флюиде при заданном давлении (графы 2, 3), расчетные молярности некоторых компонентов и величина pH

Table 1. Comparison of diaspore/corundum calculated equilibrium temperatures with experimental data [12] in a pure aqueous fluid at a given pressure (graphs 2, 3), calculated molality of some components and pH value

P, бар P, bar	T, °C, расчет T, °C, calculated	T, °C, эксп [12] T, °C, exper [12]	$\text{Al}(\text{OH})^{+2}$	AlO^{+}	Al^{+3}	AlO_2^{-}	pH
1	2	3	4	5	6	7	8
7500	460	460	$8 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-5}$	4.2
2400	395	405	$5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-18}$	$10 \cdot 10^{-6}$	4.8
1000	370	375	$9 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-10}$	—	$5 \cdot 10^{-6}$	5.1



малых количествах (табл. 1). Таким образом, в области давлений 1000–7500 бар в чистом водном флюиде реакция «диаспор – корунд» проходит при температурах 370–460 °С (табл. 1 и рис. 3).

Вторая задача

Система $\text{AlO}[\text{OH}]-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{C}$

Данная модель, так же как и первая, состояла из двух резервуаров. В первый резервуар помещались CO_2 , H_2O и небольшое количество углерода. Эта смесь переходила во второй резервуар, где находился Al_2O_3 в количестве 0.01 моля. Небольшое количество углерода подбиралось таким образом, чтобы во втором резервуаре образовалась углекислотно-метановая газовая смесь в мольном соотношении, близком к полученному нами при исследовании включений. Использовались три варианта состава газовой смеси. В варианте А отношение $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ (по ко-

личеству молей) было равно 1/30; в составе В — 30/10, и в варианте С — 30/1. Таким образом, в варианте А задача решалась с существенно углекислотным флюидом, в варианте В — с углекислотно-водным и в варианте С — с существенно водным газовым флюидом. Результаты расчетов показаны на рис. 3, а в таблице 2 приводятся данные по составу равновесной газовой смеси при РТ-условиях равновесия диаспор/корунд для варианта А. На рис. 3 видно сильное смещение равновесия диаспор/корунд в низкотемпературную область в вариантах А и В сравнительно с положением равновесия диаспор/корунд в чисто водном флюиде. В то же время расчеты по варианту С показали положение равновесия, близкое к рассчитанному в первой задаче.

Обсуждение материалов

На основании вышеизложенного легко представить образование диаспора следующим образом. Очевидно, что кристаллы корунда обсуждаемого месторождения при своем росте захватывали флюид, который сохранялся в образовавшихся включениях. В процессе постепенного снижения температуры в закрытых включениях создавались условия для реакции захваченного флюида с поверхностью кристалла корунда, что и привело к образованию диаспора, согласно рассчитанной реакции (рис. 3). При этом сами кристаллы корунда оставались устойчивыми вследствие быстрого ухода флюида из корундовых жил. Поскольку положение равновесия диаспор/корунд в варианте расчета А (рис. 3) не зависит от давления, а состав модельной газовой смеси практически совпадает с составом флюида, определяемым в первичных флюидных включениях по данным рамановской спектроскопии (табл. 2), то можно полагать, что изучаемые дочерние фазы диаспора образовались при температуре не выше 305 °С. С другой стороны, при известной температуре и составе флюида переход корунд/диаспор может служить вероятной оценкой величины давления.

Выводы и перспективы

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты:

1. В корундах золоторудного месторождения Сутара на основе современных методов анализа установлены первичные флюидные включения, состоящие из смеси углекислоты и метана, содержащие дочернюю кристаллическую фазу диаспора.

2. Методом физико-химического моделирования определена температура образования диаспора во включениях на корундовой матрице, равная 305 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов: РФФИ № 15-05-00809, РФФИ № 16-05-00283, ДВО РАН № 15-1-2-0030

Литература

1. Авченко О. В., Чудненко К. В., Александров И. А. Основы физико-химического моделирования минеральных систем. М.: Наука, 2009. 229 с.
2. Буравлева С. Ю. Особенности минерогенеза корунда на примере исследования месторождения Сутара (ЕАО) // Вестник ДВО РАН. 2014. Т. 2. С 68–72.
3. Буравлева С. Ю., Пахомова В. А., Тишкина В. Б. Корунды месторождения Сутара: условия образования, обзор минеральных парагенезисов и происхождение // Известия вузов. Геология и разведка. 2014. Т. 3. С 12–19.

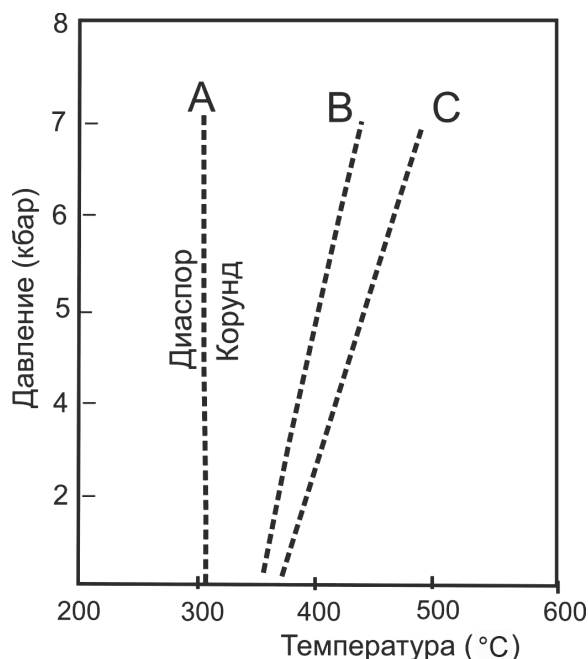


Рис. 3. Положение линии равновесия «диаспор – корунд» на Р-Т-диаграмме при разном мольном отношении $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$. В газовой смеси — пунктирные линии А, В, С и в системе $\text{AlO}[\text{OH}]-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ — сплошная линия: А — существенно углекислотный флюид, отношение $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 = 1/30$; В — углекислотно-водный флюид, отношение $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 = 30/10$; С — существенно водный флюид, отношение $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 = 30/1$

Fig. 3. The position of the equilibrium line diaspore-corundum in the P-T-diagram with different molar ratio $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ in the gas mixture, the dashed lines А, В and С and in the $\text{AlO}[\text{OH}]-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ system are the solid line: А — mostly carbon dioxide fluid, the ratio $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 = 1/30$. В — carbonate-aqueous fluid, the ratio $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 = 30/10$; С — mostly aqueous fluid, the ratio $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 = 30/1$

Таблица 2. Количества газов (мол. %) в равновесии диаспор/корунд при давлении 500–5000 бар и температуре 305 °С (вариант расчета А)

Table 2. Quantities of gases (mol %) in diaspore/corundum equilibrium at pressure 500–5000 bar and temperature 305 °С (variant А)

P, бар P, bar	T, °C	CO_2	CO	H_2	CH_4	H_2O
5000	305	0.984	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	0.016	—
2000	305	0.985	$9.6 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	0.016	$6 \cdot 10^{-6}$
1000	305	0.981	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0.013	$5 \cdot 10^{-3}$
500	305	0.970	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0.001	$29 \cdot 10^{-3}$



4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:200 000: Объясн. зап. / Под ред. А. Ф. Васькина. СПб., 1999. 186 с.
5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. (1982) Свойства газов и жидкостей: Справ. пособие. Л.: Химия, 592 с.
6. Чудненко К. В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Гео, 2010. 287 с.
7. Шапошников Е. Я. Корундовая минерализация прииска Сутар. 1945 г.: Отчет о результатах геолого-поисковых работ на корунд в 1943 и 1944 гг. в районе прииска Сутар Бирского района ЕАО Хабаровского края. Протокол ТКЗ № 30 от 4.12.1945 г.
8. Buravleva S. Y., Smirnov S. Z., Pakhomova V. A., Fedoseev D. G. Sapphires from the Sutara placer in the Russian far East. // *Gems & Gemology*. 2016, Vol. 52, No. 3, pp. 252–264.
9. Burke E. A. J. Raman microspectrometry of fluid inclusions. // *Lithos*. 2001, Vol. 55, pp. 139–158.
10. Dharmaratne P. G. R., Premasiri H. M. R., Dillimuni D. Sapphires from Thammannawa, Kataragama Area, Sri Lanka. // *G&G*. 2002, Vol. 48, No. 2, pp. 98–107, <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.48.2.98>.
11. Giuliani G., Bubessey J., Banks D., Vinh H.Q., Lhomme T., Pironon J., Garnier V., Trinh P.T., Long P.V., Ohnenstetter D., Schwartz D. CO₂-H₂S-COS-S₈-ALO(OH)- bearing fluid inclusions in ruby from marble-hosted deposits in Luc Yen, North Vietnam. // *Chemical geology*. GEOELSEVIER. 2003, pp. 167–185.
12. Haas G. Diaspore – crundum equilibrium determined by epitaxis of diaspora on corundum. // *American Mineralogist*. 1972, Vol. 57, pp. 1375–1385.
13. Holland T. J. B., Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest // *Journ. of Metamorphic Geology*. 1998. V. 16. № 3. pp. 309–343.
14. Lee B. I., Kesler M. G. Generalized thermodynamic correlations based on three parameter corresponding // *Journal AIChEJ - American Institute of Chemical Engineers*. 1975. V. 21. № 3. pp. 510–527.
15. Maesschalck A. A., Oen I. S. Fluid and mineral inclusions in corundum from gem gravels in Sri Lanka. // *Mineralogical Magazine*. 1989, Vol. 53, pp. 539–545.
16. Nguyen N. K., Chakkaphan S., Duong A. T., Nguyen V. N., Nguyen T. M. T., Nguy T. N. Ruby and sapphire from the Tan Huong — Truc Lau Area, Yen Bai Province, northern Vietnam. // *Gems & Gemology*. 2011, Vol. 47, No. 3, pp. 182–195, <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.47.3.182>.
17. Peretti A., Peretti F., Kanpraphai A., Bieri W. P., Hametner K., Günther D. Winza rubies identified. // *Contributions to Gemology*. 2008, No. 7, Second Edition. GRS Gemresearch Swisslab, Switzerland, 97 pp.
18. Perkins D., Essene E. J., Westrum E. F., Wall V. J. New thermodynamic data for diaspore and their application to the system Al₂O₃-SiO₂-H₂O¹. // *American Mineralogist*. 1979, Vol. 64, pp. 1080–1090.
19. Schmetzer K., Medenbach O. Examination of three-phase inclusions in colorless, yellow, and blue sapphire from Sri Lanka. // *Gems & Gemology*. 1988, No 2, pp. 107–111.
20. Schwarz D., Pardiou V., Saul J. M., Schmetzer K., Laurs B. M., Giuliani G., Klemm L., Malsy A-K., Erel E., Hauzenberger C., Toit G. D., Fallick A. E., Ohnenstetter D. Rubies and sapphires from Winza, Central Tanzania. // *Gems & Gemology*. 2008, Vol. 44, No. 4, pp. 322–347, <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.44.4.322>.
21. Shock E. L., Oelkers E. H., Johnson J. W., et.al. (1992) Calculation of thermodynamic and transport properties of aqueous species at high pressures and temperatures: Effective electrostatic radius to 1000 °C and 5 kbar. *Journal Chem. Soc. Faradey Trans.* 88, 803–826
22. Shor R., Weldon R. Ruby and sapphire production and distribution: A quarter century of change. // *Gems & Gemology*. 2009, Vol. 45, No. 4, pp. 236–259, <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.45.4.236>.

References

1. Avchenko O. V., Chudnenko K. V., Aleksandrov I. A. *Osnovy fiziko-himicheskogo modelirovaniya mineralnyh system* (Basic physical and chemical modeling of mineral systems). Moscow: Nauka, 2009, 229 pp.
2. Buravleva S. Yu. *Osobennosti mineragenii korunda na primere issledovaniya mestorozhdeniya Sutara (EAO)* (Features of corundum minerageny on example of Sutara deposit). Vestnik DVO RAN, 2014, V. 2, pp. 68–72.
3. Buravleva S. Yu., Pakhomova V. A., Tishkina V. B. *Korundy mestorozhdeniya Sutara: usloviya obrazovaniya, obzor mineralnyh paragenезisov i proishozhdenie* (Sutara corundum: formation conditions, review of mineral paragenesis and origin). *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 2014, V. 3, pp. 12–19.
4. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii* (State geological map). 1:200 000: explanatory note. Ed. A. F. Vaskin. Saint-Petersburg, 1999, 186 pp.
5. Rid R., Prausnits Dzh., Shervud T. (1982) *Svoistva gazov i zhidkostei: Sprav. posobie*. (Properties of gases and liquids: reference book). Leningrad: Himiya, 592 pp.
6. Chudnenko K. V. *Termodinamicheskoe modelirovanie v geohimii: teoriya, algoritmy, programnoe obespechenie, prilozheniya* (Thermodynamic modeling in geochemistry: theory, algorithms, software, applications). Novosibirsk: Akademicheskoe izdatelstvo Geo, 2010, 287 pp.
7. Shaposhnikov E. Ya. *Korundovaya mineralizatsiya priiska Sutar. 1945 g. Otchet o rezul'tatah geologo-poiskovyh rabot na korund v 1943 i 1944 gg. v raione priiska Sutar Birskego raiona EAO Habarovskogo kraia* (Corundum mineralization of Sutar deposit. 1945. Report about results of geological prospecting works for corundum in 1943 and 1944 in area opf Sutar deposit of Birske area of Khabarovsk region). Protocol No. 30 from 4.12.1945
8. Buravleva S. Y., Smirnov S. Z., Pakhomova V. A., Fedoseev D. G. Sapphires from the Sutara placer in the Russian far East. *Gems & Gemology*. 2016, Vol. 52, No. 3, pp. 252–264.
9. Burke E. A. J. Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos*. 2001, Vol. 55, pp. 139–158.
10. Dharmaratne P. G. R., Premasiri H. M. R., Dillimuni D. Sapphires from Thammannawa, Kataragama Area, Sri Lanka. *G&G*. 2002, Vol. 48, No. 2, pp. 98–107, <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.48.2.98>.
11. Giuliani G., Bubessey J., Banks D., Vinh H.Q., Lhomme T., Pironon J., Garnier V., Trinh P.T., Long P.V., Ohnenstetter D., Schwartz D. CO₂-H₂S-COS-S₈-ALO(OH)- bearing fluid inclusions in ruby from marble-hosted deposits in Luc Yen, North Vietnam. *Chemical geology. GEOELSEVIER*. 2003, pp. 167–185.
12. Haas G. Diaspore – crundum equilibrium determined by epitaxis of diaspora on corundum. *American Mineralogist*. 1972, Vol. 57, pp. 1375–1385.
13. Holland T. J. B., Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest // *Journ. of Metamorphic Geology*. 1998. V. 16. № 3. pp. 309–343.



14. Lee B. I., Kesler M. G. Generalized thermodynamic correlations based on three parameter corresponding // Journal AIChEJ - American Institute of Chemical Engineers. 1975. V. 21. № 3. pp. 510–527.
15. Maesschalck A. A., Oen I. S. Fluid and mineral inclusions in corundum from gem gravels in Sri Lanka. // Mineralogical Magazine. 1989, Vol. 53, pp. 539–545.
16. Nguyen N. K., Chakkaphan S., Duong A. T., Nguyen V. N., Nguyen T. M. T., Nguy T. N. Ruby and sapphire from the Tan Huong – Truc Lau Area, Yen Bai Province, northern Vietnam. // Gems & Gemology. 2011, Vol. 47, No. 3, pp. 182–195, <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.47.3.182>.
17. Peretti A., Peretti F., Kanpraphai A., Bieri W. P., Hametner K., Günther D. Winza rubies identified. // Contributions to Gemology. 2008, No. 7, Second Edition. GRS Gemresearch Swisslab, Switzerland, 97 pp.
18. Perkins D., Essene E. J., Westrum E. F., Wall V. J. New thermodynamic data for diaspore and their application to the system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}^1$. American Mineralogist. 1979, Vol. 64, pp. 1080–1090.
19. Schmetzer K., Medenbach O. Examination of three-phase inclusions in colorless, yellow, and blue sapphire from Sri Lanka. Gems & Gemology. 1988, No 2, pp. 107–111.
20. Schwarz D., Pardieu V., Saul J. M., Schmetzer K., Laurs B. M., Giuliani G., Klemm L., Malsy A-K., Erel E., Hauzenberger C., Toit G. D., Fallick A. E., Ohnenstetter D. Rubies and sapphires from Winza, Central Tanzania. Gems & Gemology. 2008, Vol. 44, No. 4, pp. 322–347, <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.44.4.322>.
21. Shock E. L., Oelkers E. H., Johnson J. W., et.al. (1992) Calculation of thermodynamic and transport properties of aqueous species at high pressures and temperatures: Effective electrostatic radius to 1000 °C and 5 kbar. *Journal Chem. Soc. Faraday Trans.* 88, 803–826.
22. Shor R., Weldon R. Ruby and sapphire production and distribution: A quarter century of change. Gems & Gemology. 2009, Vol. 45, No. 4, pp. 236–259, <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.45.4.236>.



ХРОМЖЕЛЕЗИСТЫЕ МЕТАКОЛЛОИДНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗ БЕЛЫХ КАРНАЛЛИТИТОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

И. И. Чайковский, Е. П. Чиркова, Д. Е. Трапезников

Горный институт УрО РАН, Пермь

ilya@mi-perm.ru

Исследованы морфология и состав метакolloидных оксигидроксидных стяжений из белой карналлитовой породы, образование которой связывается с со складчатой перекристаллизацией гематит- и гётитсодержащего карналлитита в присутствии кислых водородсодержащих рассолов. Предполагается, что такой состав рассолов формируется в результате радиационного окисления изоморфной примеси Fe^{2+} и радиолитизации кристаллизационной воды. Допускается, что первым осаждался хром из сульфатно-хлоридных, а затем железо из хлоридных коллоидов. Старение коллоидных сгустков в восстановительной среде привело к формированию акаганеита и хромистого акаганеита с включениями ковеллина, силицидов и самородно-металлических фаз.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение, поликомпонентные коллоиды, акаганеит, Cr-акаганеит, $\text{Fe}_{15}\text{Cr}_4\text{Si}$, Cr_2Fe .

CR-Fe METACOLLOIDAL NODULES FROM THE WHITE CARNALLITE ROCKS OF THE VERKHNKAMSKOE SALT DEPOSIT

I. I. Tchaikovsky, E. P. Chirkova, D. E. Trapeznikov

Mining Institute of the Ural Branch of RAS, Perm

The morphology and composition of the chromium-ferrum metacolloidal nodules from the white carnallite rocks of the Verkhnekamskoe Deposit were investigated. The white carnallite rocks were formed during a tectogenesis by recrystallization of hematite- and goethite-rich carnallite rocks in the presence of acidic hydrogen-containing brines. The brines composition is determined by radiation oxidation of the isomorphous iron (II) and a radiolysis of the crystallization water. It is assumed that the chromium precipitated from sulfate-chloride colloids and later the iron precipitated from chloride brines. Aging of colloidal clots led to the formation of the akaganeite and Cr-akaganeite with a covellite and native phase inclusions.

Keywords: Verkhnekamskoe Deposit, multicomponent colloids, akaganeite, Cr-akaganeite, $\text{Fe}_{15}\text{Cr}_4\text{Si}$, Cr_2Fe .

Верхнекамское месторождение солей расположено в Предуральском краевом прогибе и представляет собой хорошо стратифицированную линзовидную залежь, состоящую из четырех толщ (снизу вверх): подстилающей галитовой, сильвинитовой, карналлитовой и покровной галитовой. Согласно субгоризонтальное залегание соляных пластов осложнено складчатостью различных порядков. Калийные соли обычно окрашены примесью минералов железа. Первичные сильвиниты имеют красный или розовый цвет, обусловленный различным содержанием гематита. Карналлитовая порода чаще всего красная, красно-оранжевая или оранжевая за счет включений гематита и/или гётита. Реже встречается белый карналлит, который образует раздувы в сводовой части антиклинальных складок и линзовидные тела вдоль зон послонного срыва (рис. 1). Изучение такой породы, отобранной с северо-западной части шахтного поля 2-го Березниковского рудника [13], показало, что она состоит на 60 % из карналлита, на 20 % — из вторичного сильвина и на 20 % — из галита. Характеризуется равномерно-зернистой структурой, содержит большое количество газовой-жидких включений в интерстициях зерен и обогащена по сравнению с окружающими ее солями водородом и метаном. Структурная позиция белой карналлитовой породы и присутствие зерен вторичного сильвина, образовавшихся вследствие частичного разложения карналлита ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \text{KCl} + \text{MgCl}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$), позволяют объяснить ее формирование локальным дислокационным метаморфизмом (соскладчатый катагенезом) и перекристаллизацией в присутствии насыщенных рас-

солов. Целью наших исследований было выявление минералого-геохимической специфики образования белых карналлитов.

В статье не рассматриваются многократно обсуждаемые в литературе процессы образования вторичных «пестрых сильвинитов», происходящие при полном разложении карналлитов.

Методы и результаты исследований

Исходным материалом послужили пробы весом около 1 кг, отобранные из красных и белых карналлитов. Минералогический анализ полученного нерастворимого остатка позволил наряду с типичными для соляной залежи кристаллами гипса, доломита, целестина, кварца и калиевого полевого шпата выявить в белых карналлититах необычные стяжения оксигидроксидов железа и хрома лепешкообразной формы. Исследование пятнадцати таких стяжений, проведенное на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеноспектрального микрозондового анализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20, позволило показать, что в центральной своей части они состоят из плотной однородной массы, разбитой трещинами синерезиса. В краевой части стяжения имеют ажурно-зернистую структуру, обусловленную срастанием призматических кристаллитов и сферолитовых микроагрегатов, на которые нарастают более поздние листоватые индивиды (рис. 2). Согласно результатам рентгеноспектрального микрозондового анализа, рассматриваемые стяжения характеризуются отчетливой зональностью (табл. 1, 2; рис. 3): их вну-

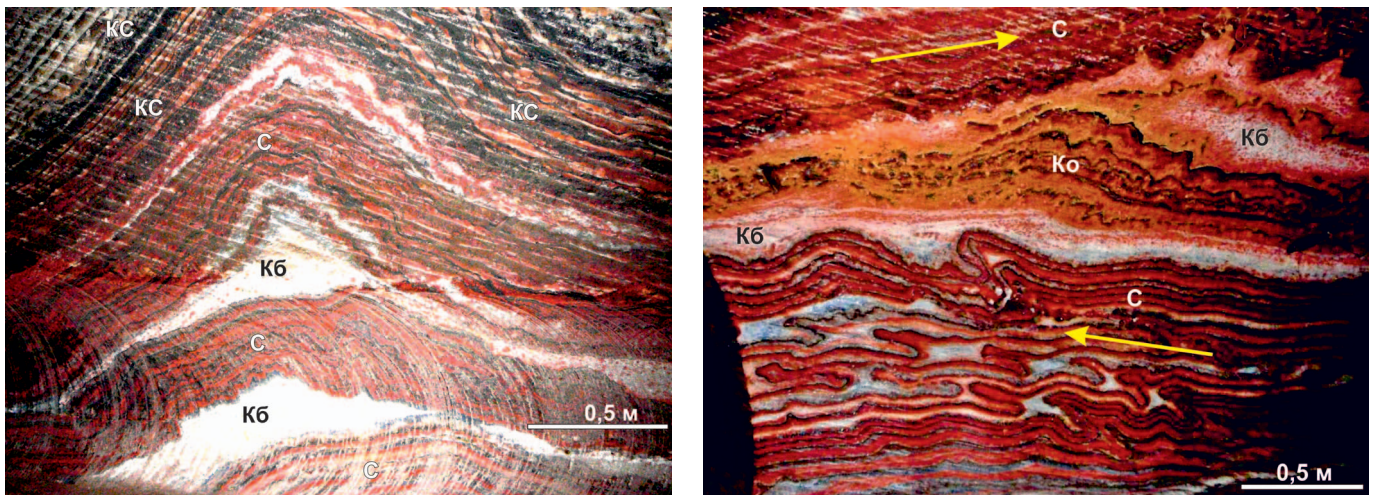


Рис. 1. Структурное положение белых карналлититов в солях пласта АБ. Буквами обозначены каменная соль (КС), сильвиниты (С), оранжевые (Ко) и белые (Кб) карналлититы. Стрелками показаны направления течения солей

Fig. 1. The location of white carnallites in the bed «AB». The letters indicate a rock salt (kc), sylvinite (c), orange (Ko) and white (K6) carnallites. The arrows show the directions of the multidirectional flow of salts

тренная часть имеет хромовый состав с примесью серы, кремния и фосфора, края отличаются преимущественно железистым составом. Кроме того, наблюдается нарастающая на стяжения зернистая микрокорка исключительно железистого состава. В качестве сквозной примеси выступает хлор. Содержание никеля несколько увеличивается при переходе от внутренней части к краям. В наиболее крупных (не менее 500 мкм) стяжениях обнаруживается промежуточная зона хромисто-железистого состава (рис. 4). На поэлементных картах видно, что хро-

мистые участки могут присутствовать не только в центре стяжений, но и в железистой краевой зоне в виде остроугольных реликтовых участков, что говорит о наличии перерыва между временем формирования этих фаз.

На основании полученных данных железистые оксигидроксиды краевой части стяжений могут быть отнесены к акаганеиту — моноклинному β -полиморфу гётита, кристаллохимическую формулу которого представляют либо в традиционном упрощенном виде как $\text{FeO}(\text{OH}, \text{Cl})$, либо в более сложном — $(\text{Fe}^{3+}, \text{Ni}^{2+})_8(\text{OH}, \text{O})_{14.75}\text{Cl}_{1.25} \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

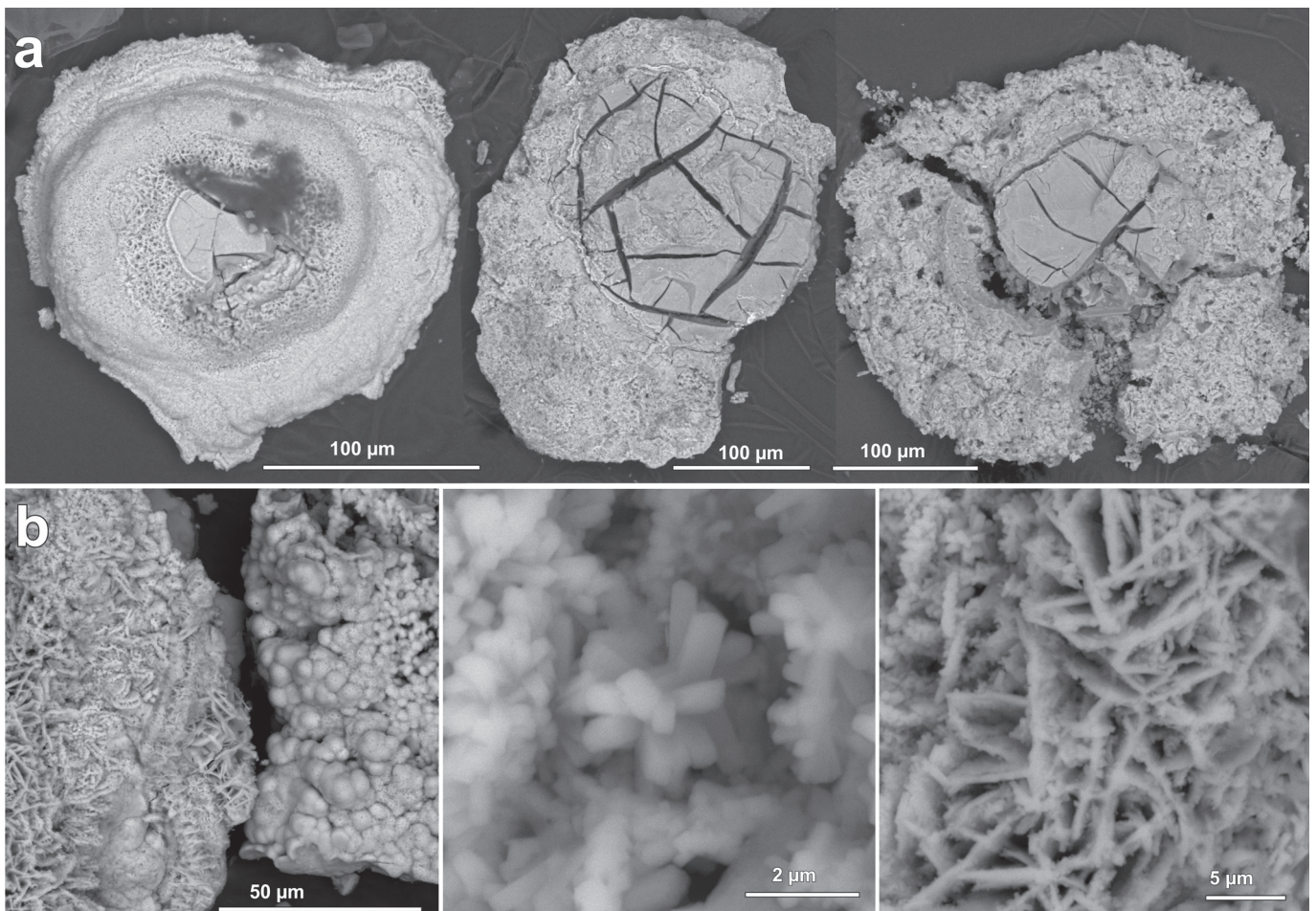


Рис. 2. Зональные стяжения Fe-Сг-оксигидроксидов (а) и детали поверхности железистой каймы (b)

Fig. 2. Zonal units of Fe-Cr oxides-hydroxides (a) and structure of ferrous border (b)

Таблица 1. Представительные данные о химическом составе центральной части стяжений (мас. %)
Table 1. Representative analyses of the nodules central part (wt. %)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O	41.70	44.16	45.28	47.79	39.21	48.14	48.13	49.06	38.37	32.13
Si	1.12	0.92	0.52	0.58	1.13	1.42	0.74	2.10	1.13	0.80
P	0.15	0.00	0.16	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	2.92	3.47	3.11	2.92	1.80	3.56	2.53	1.29	1.20	1.46
Cl	1.15	3.99	3.42	3.04	4.14	2.42	3.29	4.16	4.20	3.22
Cr	49.73	43.66	40.19	34.17	31.65	27.04	15.47	16.57	20.35	20.69
Fe	3.23	3.80	7.31	11.51	21.12	16.79	29.84	26.82	33.99	40.72
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.64	0.00	0.00	0.75	0.98

Примечание. 1–6 — центральная (Cr) зона; 7–10 — прицентральная (Cr-Fe) зона. Результаты анализа приведены к 100 %.
 Note. 1–6 — central (Cr) zone; 7–10 — near the centre (Cr-Fe zone). Analyses were normalized to 100 %.

Таблица 2. Представительные данные о химическом составе внешней части стяжений (мас. %)
Table 2. Representative analyses of the nodules outer part (wt. %)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O	46.37	42.31	44.70	42.58	36.94	35.09	31.90	43.52	38.04	36.48
Si	0.98	0.50	0.62	1.69	0.30	0.44	0.49	0.37	0.28	0.17
S	0.80	0.60	0.66	0.80	0.31	0.80	0.74	0.19	0.19	0.00
Cl	4.98	5.13	5.13	2.33	6.40	2.53	3.67	5.82	5.83	6.09
Cr	7.68	8.51	3.01	1.19	0.00	1.03	0.00	0.00	1.30	0.00
Fe	39.20	42.14	45.88	50.70	55.43	59.20	62.21	50.10	54.36	57.26
Ni	0.00	0.81	0.00	0.72	0.62	0.91	0.99	0.00	0.00	0.00

Примечание. 1–7 — краевая зона, 8–10 — кристаллиты на поверхности.
 Note. 1–7 — edge zone, 8–10 — crystallites on the nodule surface

Учитывая баланс зарядов и формульный коэффициент при ионе хлора, формулу можно изобразить в следующем виде: $(\text{Fe}^{3+}_{8-x}\text{Ni}^{2+}_x)\text{O}_8(\text{Cl}_{1.25}\text{OH}_{6.75-x}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Природный $\text{CrO}(\text{OH})$ тоже образует несколько полиморфных модификаций — одну тригональную и две ромбические. Предполагая, что присутствующие в составе стяжений примеси

S, Si, и P представлены механическими включениями фаз ($\text{Fe}_2[\text{SO}_4]_3$, SiO_2 и $\text{Fe}[\text{PO}_4]$), которые могли обособиться в процессе старения поликомпонентных коллоидных растворов, эмпирические формулы оксигидроксидных растворов можно представить в следующем виде:

Центральная зона ($n = 35$) — $(\text{Cr}_{4.87-7.57}\text{Fe}_{0-1.02}\text{Ni}_{0-0.27})\text{O}_8(\text{Cl}_{0.26-1.44}\text{OH}_{6.56-7.74}) \cdot (3-22)\text{H}_2\text{O}$;
 Промежуточная зона ($n = 5$) — $(\text{Fe}_{4.38-4.78}\text{Cr}_{2.70-3.19}\text{Ni}_{0-0.17})\text{O}_8(\text{Cl}_{0.57-1.18}\text{OH}_{6.82-7.26}) \cdot (2-16)\text{H}_2\text{O}$;
 Краевая зона ($n = 26$) — $(\text{Fe}_{6.32-8.00}\text{Cr}_{0-1.40}\text{Ni}_{0-0.16})\text{O}_8(\text{Cl}_{0.52-1.46}\text{OH}_{6.48-7.41}) \cdot (1-13)\text{H}_2\text{O}$;
 Зернистая микрокорка ($n = 5$) — $\text{Fe}_{7.75-8}\text{O}_8(\text{Cl}_{1.32-1.46}\text{OH}_{6.54-6.68}) \cdot (3-10)\text{H}_2\text{O}$.

Анализ показывает, что наиболее близкой к теоретической стехиометрии акаганеита получилась формула железистого оксигидроксида, полученная для кристаллитов в зернистой микрокорке. Минералы в собственно стяжениях могут быть определены как хромовый и хромисто-железистый аналоги акаганеита.

Во внутренних частях стяжений выявлены единичные выделения ковеллина состава $\text{Cu}_{0.96-1.06}\text{S}$ (рис. 5) и многочисленные частицы Cr-Fe-силицидов и самородно-металлических фаз (табл. 3, рис. 6), группирующиеся вдоль трещин усыхания. Силициды подразделяются на хромистые, изменяющиеся по составу от CrSi_2 до Me_3Si , и железистые, варьирующие от FeSi_2 до Fe_6Si . Самородно-металлические фазы образуют прерывистый ряд в последовательности $\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}_3\text{Fe} \rightarrow \text{Cr}_2\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{Cr} \rightarrow \text{Fe}$. Эмпирические формулы наиболее часто встречающихся твердых растворов (в скобках частоты встречаемости): 1) $\text{Fe}_{0.68-0.80}\text{Cr}_{0.13-0.27}\text{Si}_{0.01-0.08}\text{Ni}_{0-0.02}$ (70 %); 2) $\text{Fe}_{0.69-0.73}\text{Cr}_{0.14-0.19}\text{Si}_{0.09-0.13}\text{Ni}_{0-0.01}$ (25 %); 3) $\text{Cr}_{0.69}\text{Fe}_{0.29}\text{Si}_{0.02}$ (5 %). Выявленные металлические фазы по составу характеризуются некоторой разупорядоченностью, но в среднем их составы могут аппроксимироваться формулами с целочисленными коэффициентами от $\text{Fe}_{15}\text{Cr}_4\text{Si}$ до Cr_2Fe .

Обсуждение результатов

Акаганеит является сравнительно редким минералом, образуясь в кислых обстановках, чаще всего в ре-

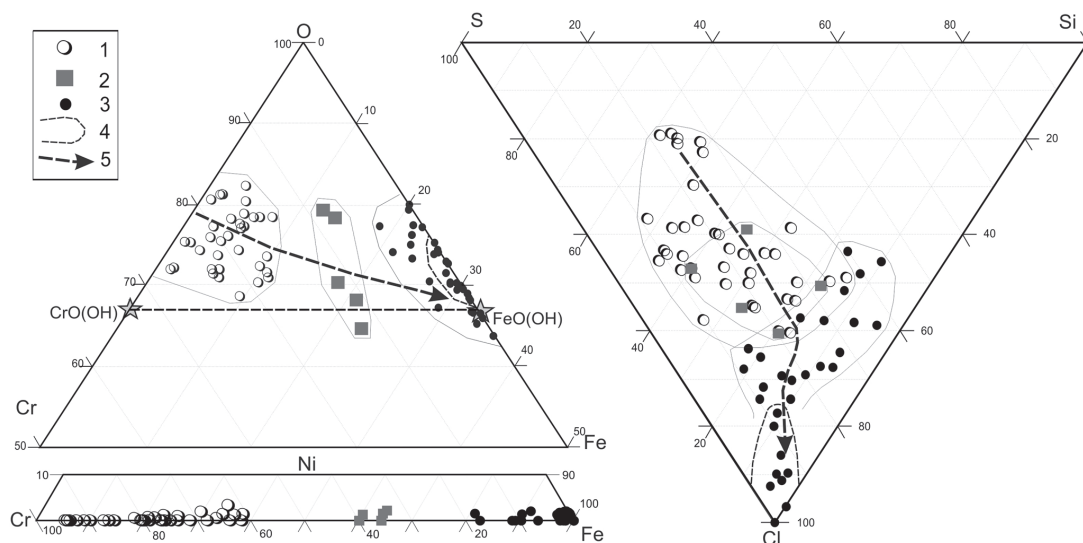


Рис. 3. Химизм оксигидроксидов в центральной (1), промежуточной (2) и краевой (3) частях стяжений, а также кристаллитов на их поверхности (4). Стрелкой (5) показано центробежное направление изменения их состава. Звездочки — точки теоретических составов оксигидроксидов хрома и железа

Fig. 3. The oxyhydroxides chemistry of the central (1), the intermediate zone (2) and edge (3) parts of the nodules, crystallites on the nodule surface (4). Arrows (5) show the direction of composition changes. Stars demonstrate points of theoretical compositions for chromium and iron oxyhydroxides

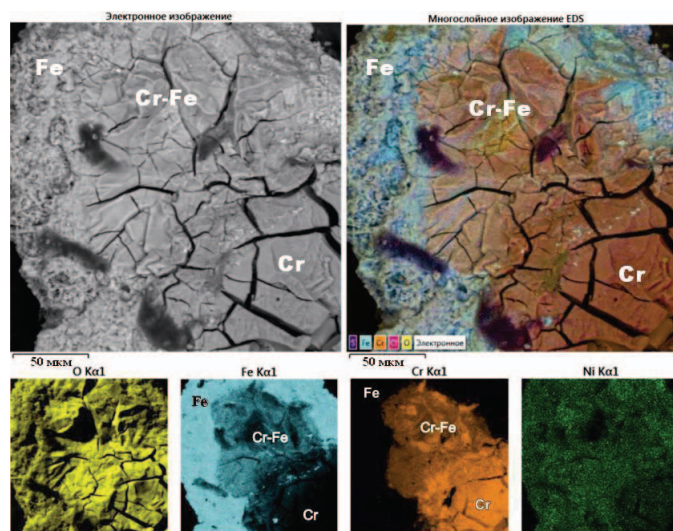


Рис. 4. Неоднородность состава типичного оксигидроксидного стяжения, выявленная с использованием характеристического рентгеновского излучения. Cr, Cr-Fe, Fe — состав микрозон по основным элементам

Fig. 4. The heterogeneity of the composition of a typical contraction oxyhydroxide as identified using the characteristic X-rays. Cr, Cr-Fe, Fe — composition on the main elements of micro-watersheds

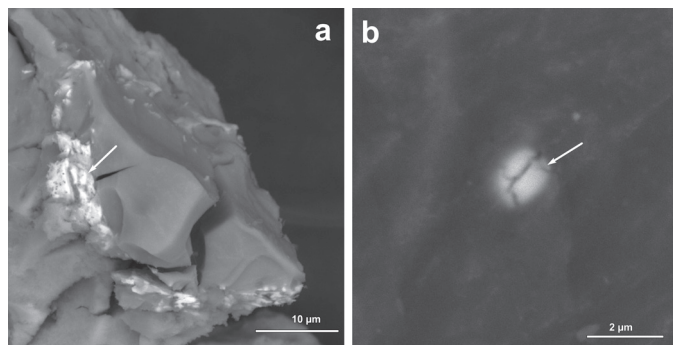


Рис. 5. Включения интерметаллида $\text{Fe}_{15}\text{Cr}_4\text{Si}$ (a) и ковеллина (b) в оксигидроксида хрома

Fig. 5. Inclusions of intermetallic compound $\text{Fe}_{15}\text{Cr}_4\text{Si}$ (a) and covellite (b) in Cr hydroxide

зультате гидролиза FeCl_3 [17, 20]. Оксигидроксиды хрома встречаются еще реже. Наиболее известные из них найдены в Республике Гайана, где в составе экзотической породы мерумита были обнаружены тригональный и ромбические полиморфы $\text{CrO}(\text{OH})$ — гримальдит, бресуэллит и гвианит, ассоциирующие с эсколаитом (Cr_2O_3), макконелитом (CuCrO_2), хромистым ганитом ($\text{Zn}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$), пирофиллитом и самородным золотом [19]. Все это дало основание объяснить образование оксигидроксидов

хрома гидролитическим разложением хромсодержащих минералов в гипергенных условиях. Очевидно, что такое же происхождение можно предполагать и в отношении γ -оксигидроксида хрома ($\text{Cr}_{0.71}\text{Al}_{0.29}\text{O}(\text{OH})$), обнаруженного в бокситах Североонежского месторождения [4].

Находки в карналлитовой зоне Верхнекамского месторождения аутигенных гидроксидов алюминия — колломорфных выделений дойлеита или гиббсита ($\text{Al}(\text{OH})_3$), кристаллов лесюкита ($\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и тунисита ($\text{NaCa}_2\text{Al}_4(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_8\text{Cl}$), ассоциирующих с каолинитом и алюмофосфатом ряда гояцит — вудхаузит — сванбергит [14, 15], а также почти повсеместное распространение новообразованных кристаллов кварца, реже кристобалита, рутила и анатаза могут свидетельствовать о проявившемся разложении галопелитового алюмосиликатного материала, содержание которого достигает 5 мас. %.

1. Механизмы образования и растворения красящего вещества карналлита

При осаждении карналлита ($\text{KMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) в его кристаллическую структуру изоморфно входят NH_4 на место калия и Fe^{2+} на место магния [1, 6]. Окисление двухвалентных ионов железа может привести к микрофазовой гетерогенизации карналлита — образованию в нем локальных кристаллографически ориентированных микровыделений гематита, придающих карналлиту так называемый эффект солнечного камня.

Связь оксигидроксидов железа только с зернами калийсодержащих минералов и отсутствие их в сосуществующем галите и галопелитовом материале (глина + ангидрит + карбонаты + органическое вещество) говорит о локальном (внутризерновом) характере проявления процессов окисления, которые могли быть вызваны действием радиационного излучения изотопа K^{40} . Как известно, на таком переходе Fe^{2+} в Fe^{3+} основан ферросульфатный дозиметр Х. Фрикке. Такого рода окисление железа может происходить по схеме $2\text{FeCl}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{HCl} + \text{H}_2\uparrow$, даже несмотря на наличие в сильвине и карналлите газовой-жидких включений, содержащих газообразные углеводороды и битумоиды. В. П. Савченко [8] рассчитала, что радиационное превращение $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ при среднем содержании образовавшегося в карналлите гематита 0.2 % приводит к высвобождению 855 см^3 водорода на 1 кг карналлита. Принимающая участие в реакции вода могла поступать в кристаллы сильвина из межзерновых и захваченных газовой-жидких включений, а в карналлите могла быть задействована также его собственная кристаллизационная вода, часть которой высвобождалась при переходе железа в гематит. Радиолиз этой воды [3, 9] и разложение ионов аммония [1] также мо-

Таблица 3. Химический состав силицидов, мас. %
Table 3. The chemical composition of intermetallide compounds, wt. %

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Si	4.14	4.97	3.40	6.82	3.94	4.92	5.89	2.34	2.56	6.04
Cr	19.81	16.95	13.54	14.08	12.39	16.50	19.00	16.19	18.63	16.55
Fe	76.05	78.08	81.98	77.80	82.52	77.45	74.11	80.43	77.34	76.51
Ni	0.00	0.00	1.08	1.30	1.15	1.13	1.00	1.04	1.48	0.90
Сумма / Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
№ п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Si	2.82	2.20	2.28	2.06	2.30	1.83	0.75	1.37	1.24	0.70
Cr	25.67	21.68	19.39	19.76	18.78	26.45	16.78	18.93	19.53	68.00
Fe	70.47	75.16	77.02	78.18	77.62	70.61	81.41	78.69	78.00	31.30
Ni	1.04	0.97	1.31	0.00	1.30	1.12	1.06	1.01	1.23	0.00
Сумма / Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

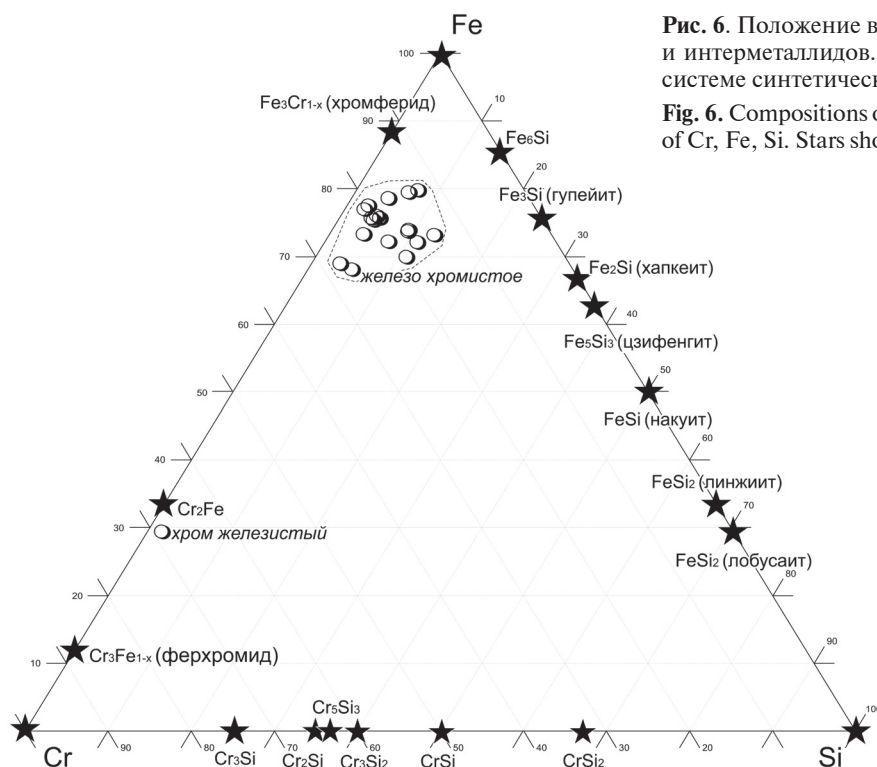


Рис. 6. Положение выявленных в стяжениях Cr-Fe-силицидов и интерметаллидов. Звездочками показаны известные в этой системе синтетические фазы и минералы

Fig. 6. Compositions of the native metal phases represented in terms of Cr, Fe, Si. Stars show known intermetallic phase and minerals

гли приводить к образованию водорода. Продуктами радиолиза [5] являются положительный ион воды (H_2O^+), электрон (e^-), ион гидроксония (H_3O^+), протон (H^+), гидроксильные радикалы ($H\cdot$, $OH\cdot$, $HO_2\cdot$), гидроксил-ион (OH^-), гидратированный электрон (e^-_{aq}) и молекулы H_2 и H_2O_2 , имеющие разную активность и миграционную способность.

На Верхнекамском месторождении широко развиты карналлитовые агрегаты, где чешуйки гематита сохранились только в центральных частях зерен, а краевые окрашены в оранжевый цвет игольчатыми микроиндивидами гётита (рис. 7). Смена гематита гётитом ($Fe_2O_3 + H_2O = 2FeO(OH)$) говорит о проявившейся реакции гидратации в оранжевом карналлите вследствие миграции водных растворов вдоль межзерновых границ внутри карналлитовых пластов.

Вынос почти всего железа из белого карналлитита может говорить о том, что растворы, принимавшие участие в его перекристаллизации, имели кислый характер. Это дает основание предполагать, что в процессе складчатости некоторые продукты окисления железа (HCl , H_2) или радиолиза (H_2 , H^+ , H_3O^+) могли мигрировать с рассолами в сводовые части антиклиналей. Более кислый состав маточных рассолов, сосуществующих с карналлитовыми породами, по сравнению с сильвиновыми (рис. 8) способствовал более интенсивному окислению Fe^{2+} или радиолизу в водосодержащих пластах. Об этом может говорить и более высокое содержание в карналлитовой породе метана и водорода по отношению к сильвиниту (рис. 9).

2. Первоисточник хрома

Исследования гематита и гётита из красных и оранжевых карналлититов методом рентгеноспектрального

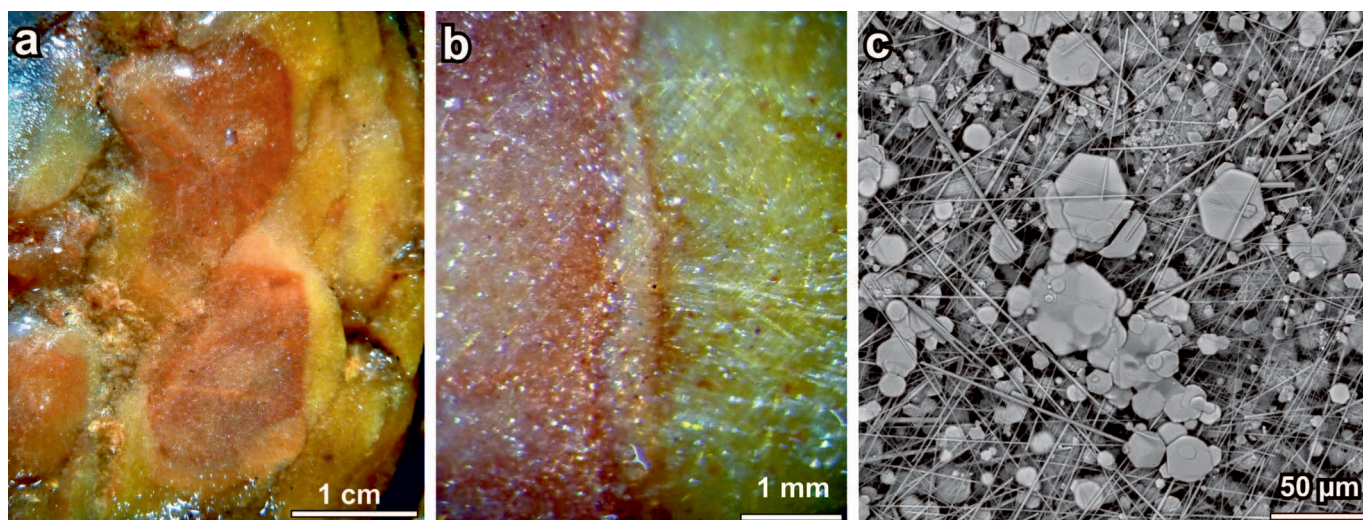


Рис. 7. Карналлитовая порода с зональным распределением красящего вещества (а), контакт между гематитовой и гётитовой зонами (б) и морфология кристаллов гематита и гётита (с)

Fig. 7. Carnallite with zonal distribution of the colouring matters (a), the contact of hematite and goethite zones (b) and the morphology of hematite and goethite crystals (c)

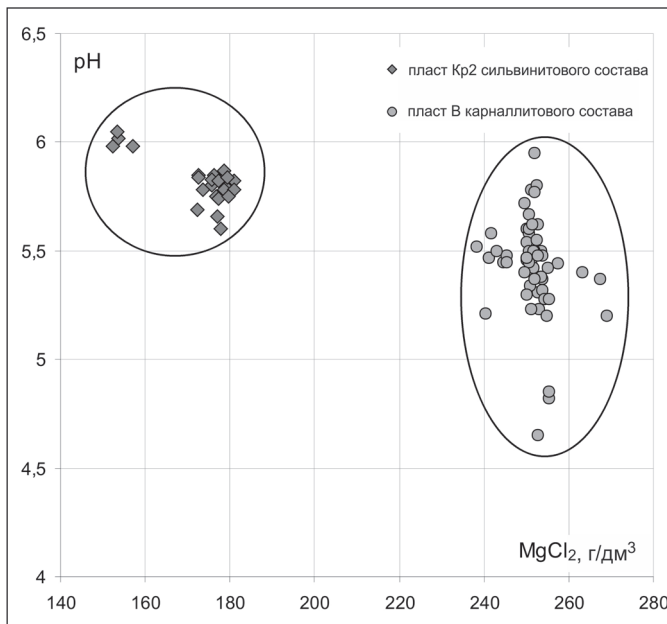


Рис. 8. Вариации pH и $MgCl_2$ в маточных рассолах некоторых сильвинитовых и карналлитовых пластов Березниковского участка Верхнекамского месторождения (построено по данным геологической службы рудника)

Fig. 8. Concentration of $MgCl_2$ versus pH of parent brines from some sylvite and carnallite rocks of the Verkhnekamskoye Deposit

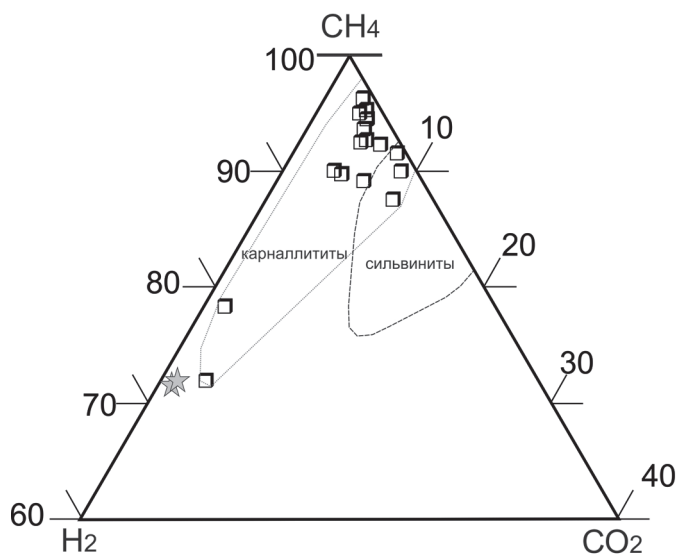


Рис. 9. Состав газовых включений в карналлититах и сильвинитах Верхнекамского месторождения (по [10] с дополнениями). Звездочками показаны составы газов в бесцветном карналлитите

Fig. 9. Composition of included gases from sylvite and carnallite rocks of the Verkhnekamskoye Deposit (based on [10], with additions). Stars show gas compositions from a colorless carnallite.

микронзондового анализа показали, что в качестве устойчивых примесей в них присутствуют только кремний и алюминий. Хром в анализах не появляется даже эпизодически. Анализ пород Верхнекамского месторождения методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) выявил содержание хрома в солях (галитите, сильвините и карналлитите) — 0.3–0.6 г/т, в сульфатах — 0.7–1.6 г/т, в галопелитовом материале — 50–106 г/т. Возможным источником хрома (и никеля) могли быть глинистые минералы, которые разлагались на более простые оксиды (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) за счет сульфатредукционной экстракции Fe, Zn, Cu, Ni и других металлов [16].

Другим источником хрома могла быть растворимая шестивалентная форма, поступавшая в седиментационный бассейн во время соленакопления. Миграция в виде Cr^{6+} , характерная для аридных областей [7], в Предуралье реализовывалась неоднократно, что выразилось в формировании волконскоита в верхнепермских отложениях татарского и казанского ярусов [11], а также полиминеральных агрегатов карбонатов кальция и цинка с хроматофосфатом свинца — вокаленитом — в нижнетриасовых глинах [10]. В первом отмечены бактериоморфные структуры, а во втором — фрагменты кольчатых колоний цианобактерий.

В настоящее время биологическая редукция и осаждение хрома широко применяется при очистке промышленных вод [2, 18]. Cr^{6+} может восстанавливаться до трехвалентного ферментативным и неферментативным способами. Ферментативное восстановление хрома осуществляют автотрофные бактерии (*Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Escherichia*, *Thiobacillus* и др.) и мицелиальные грибы. Неферментативное восстановление металлов происходит продуктами жизнедеятельности бактерий, например сероводородом, образующимся в условиях анаэробного сбраживания серосодержащих органических соединений и сульфатредукции. Ограничивающая жизнедеятельность большинства бактерий высокая минерализация (380–420 г/дм³) внутрисолевых рассолов и отсутствие биоморфных структур в хромистой части исследованных оксигидроксидных стяжений позволяет говорить о неферментативном механизме их формирования и связью с галофильными сульфатредуцирующими микроорганизмами.

На Верхнекамском месторождении установлено три этапа проявления сульфатредукции [12]. Индикатором первого является рассеянная (диагенетическая) вкрапленность сульфидов в солях. С складчатым перераспределением рассолов внутри солевой толщи связываются зоны выщелачивания хлоридов магния и калия, а также локальные зоны с пирротиновой минерализацией и/или самородной серой. Гипергенная сульфатредукция с образованием сероводородных вод, серы и сульфидов проявляется и в настоящее время в кровле соляной толщи за счет взаимодействия с атмосферными осадками. Таким образом, из-за присутствия в соляной залежи органики и сульфатов любое появление или пространственная перегруппировка вод приводит к активизации бактериальной деятельности. В целом содержание сульфатов убывает от подстилающей каменной соли к карналлитовой толще, что отражается на количестве образовавшихся сульфидов Fe, Zn, Cu, Ni, Co, As.

Выводы

Ранее предполагалось, что основные изменения минерального состава в соляной толще происходили в водонасыщенном осадке при диагенезе и складчатости, которая приводит к мобилизации флюидной фазы газовой-жидких включений, и в том числе к образованию «пестрых сильвинитов». Оба этих процесса сопровождались сульфатредукцией, интенсивность которой определялась наличием сульфатов и органического вещества. Поведение красящего вещества карналлититов и повышенное содержание в них водорода свидетельствуют о том, что основные минералообразующие процессы этой части солевого разреза определяются высвобождением кристаллизационной воды и соляной кислоты в ре-



зультате радиогенного окисления изоморфной примеси Fe^{2+} . Появление кислых растворов объясняет образование высокоглиноземистых минералов в карналлитовой зоне за счет галопелитового материала. Нагнетание этих рассолов в структурные антиклинальные ловушки приводит к частичному разложению карналлита, его полной перекристаллизации и выносу основной части железа. Неблагоприятная для миграции Sr^{6+} кислая среда и восстановительные условия могли способствовать осаждению растворимых хроматов и/или разложению хромосодержащих силикатов с образованием оксигидроксидного коллоида с добавочными анионами: SO_4^{2-} , SiO_4^{2-} , PO_4^{2-} , Cl^- . Старение коллоидных сгустков, идущее в направлении формирования Сг-акаганейта, судя по включениям самородных и сульфидных фаз вдоль трещин синерезиса, происходило в присутствии сероводорода и водорода.

Формирование собственно акаганейтовой каймы, как показывает наличие остроугольных фрагментов хромистой фазы, происходило позднее. Меньшее по сравнению с хромовой фазой содержание примесей может говорить об отложении из менее насыщенного коллоидного раствора существенно хлоридного состава. Предполагается, что кроме осаждения за счет эффекта адсорбции происходили и реакции замещения.

Таким образом, для месторождения выявлен еще один минералообразующий процесс, в котором предполагается участие сульфатредуцирующих бактерий, проявившийся в структурных ловушках, где накапливались рассолы, обогащенные продуктами радиоактивного окисления железа (и радиолиза воды).

Работа выполнена в рамках программы УрО РАН «Экстремальные (галогеенные и криогенные) процессы в геологической истории Урала: минеральные и геохимические индикаторы», проект № 15-18-5-16.

Литература

1. Апполонов В. Н. Происхождение азота в месторождениях калийных солей // Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления. Новосибирск: Наука, 1982. С. 153–157.
2. Буракаева А. Д., Русанов А. М., Лантух В. П. Роль микроорганизмов в очистке сточных вод от тяжелых металлов: Метод. пособие. Оренбург: Изд-во Оренбургского ун-та, 1999. 51 с.
3. Вовк И. Ф. О природе водорода в месторождениях калийных солей // Геохимия. 1978. № 1. С. 66–73.
4. Горшков А. И., Демина В. Н., Мохов А. В. и др. Новый γ -гидроксид хрома в бокситовых рудах Североонежского месторождения // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320. № 6. С. 1455–1458.
5. Кабакчи С. А., Булгакова Г. П. Радиационная химия в ядерном топливном цикле. М.: РХТУ, 1997. 96 с.
6. Костов И. Минералогия. М.: Мир, 1971. С. 204.
7. Перельман А. И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. 528 с.
8. Савченко В. П. Об образовании свободного водорода в земной коре, обусловленном восстановительным действием продуктов радиоактивного превращения изотопов // Геохимия. 1958. № 1. С. 14–21.
9. Сметанников А. Ф. Об образовании водорода при радиолизе кристаллизационной воды карналлита и возможные следствия этого явления // Геохимия. 2011. № 9. С. 971–980.
10. Чайковский И. И., Голдырев В. В. Апоорганические минеральные агрегаты из триасовых отложений Верхнекамской впадины // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Сб. науч. статей. Пермь: Перм. ун-т. 2004. Вып. 6. С. 64–66.
11. Чайковский И. И., Симакова Ю. С. Частинская группа месторождений // Геологические памятники Пермского края: Энциклопедия / Горный институт УрО РАН. Пермь, 2009. С. 329–334.
12. Чайковский И. И., Калинина Т. А., Коротченкова О. В., Чиркова Е. П. Эвапоритовые месторождения Пермского Прикамья и их минеральные ассоциации // Месторождения камнесамоцветного и нерудного сырья различных геодинамических обстановок (XVI Чтения памяти акад. А. Н. Заварицкого). Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2015. С. 201–206.
13. Чайковский И. И., Трапезников Д. Е., Чиркова Е. П., Каблинов О. С., Иванов О. В. Новая эпигенетическая порода Верхнекамского месторождения солей: структурная позиция, состав и газоносность // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского: Сб. науч. ст. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2016. Вып. 19. С. 379–386.
14. Чайковский И. И., Чиркова Е. П., Трапезников Д. Е. Каолинит, гоэит и гидроксиды алюминия — новые высокоглиноземистые минералы Верхнекамского месторождения // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Сб. ст. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2016. С. 94–97.
15. Чайковский И. И., Коротченкова О. В. Новые хлор- и алюминийсодержащие минералы Верхнекамского месторождения солей // Вестник Пермского университета. Геология, Вып. 2(31) 2016. С. 6–13.
16. Чиркова Е. П., Чайковский И. И. О роли сульфатредукции в минералообразовании на Верхнекамском месторождении солей // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского: Сб. науч. статей / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2012. Вып. 15. С. 79–84.
17. Яхонтова Л. К., Зверева В. П. Основы минералогии гипергенеза: Учеб. пособие. Владивосток: Дальнаука, 2000. 331 с.
18. Bopp L., Ehrlich H. Enzymatic reduction of Cr^{6+} by a strain of *Pseudomonas fluorescens* // Abstr. annu. meet. amer. soc. microbial. Washington, D.C., 1980. P. 212–216.
19. Milton C., Appleman D.E., Appleman M.H. et al. Merumite, a complex assemblage of chromium minerals from Guyana//U.S. Geol. Surv. Prof. Paper. 1976. № 887. P. 1–29.
20. Scheck J., Lemke T., Gebauer D. The role of chloride ions during the formation of akaganeyite revisited. Minerals: 2015, 5(4): P. 778–787.

References

1. Appolonov V. N. *Proishozhdenie azota v mestorozhdeniyah kaliinykh solei* (Origin of nitrogen in potassium salt deposits). *Neftegazonosnost regionov drevnego solenakopleniya* (Oil content of regions of ancient salt accumulation). Novosibirsk: Nauka, 1982, pp. 153–157.
2. Burakaeva A.D., Rusanov A.M., Lantuh V.P. *Rol mikroorganizmov v ochistke stochnykh vod ot tyazhelykh metallov* (Role of microorganisms in purification of waste waters from heavy metals). Orenburg University, 1999, 51 pp.
3. Vovk I.F. *O prirode vodoroda v mestorozhdeniyah kaliinykh solei* (Nature of hydrogen in potassium salt deposits). *Geohimiya*, 1978, No. 1, pp. 66–73.



4. Gorshkov A. I., Demina V. N., Mohov A. V. et al. *Novyi γ -gidroksid hroma v boksitovykh rudakh Severoonezhskogo mestorozhdeniya* (New chromium γ -hydroxide in bauxite ores of Severoonezhskoe deposit). *Doklady AN SSSR*, 1991, V. 320, No. 6, pp. 1455–1458.
5. Kabakchi S.A., Bulgakova G.P. *Radiatsionnaya himiya v yadernom toplivnom tsikle* (Radiation chemistry in nuclear fuel cycle). Moscow: RHTU, 1997, 96 pp.
6. Kostov I. *Mineralogiya* (Mineralogy). Moscow: Mir, 1971, pp. 204.
7. Perelman A.I. *Geohimiya* (Geochemistry). Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 528 pp.
8. Savchenko V.P. *Ob obrazovanii svobodnogo vodoroda v zemnoi kore, obuslovlennom vosstanovitel'nykh deistviem produktov radioaktivnogo prevrascheniya izotopov* (Formation of free hydrogen in earth core, conditioned by reduction action of products of radiation transformation of isotopes). *Geohimiya*, 1958, No. 1, pp. 14–21.
9. Smetannikov A.F. *Ob obrazovanii vodoroda pri radiolize kristallizatsionnoi vody karnallita i vozmozhnye sledstviya etogo yavleniya* (Formation of hydrogen at radiolysis of crystalline water of carnallite and possible consequences of this phenomenon). *Geohimiya*, 2011, No. 9, pp. 971–980.
10. Chaikovsky I.I., Goldyrev V.V. *Apoorganicheskie mineralnye agregaty iz triasovykh otlozhenii Verhnekamskoi vpadiny* (apoorganic mineral aggregates from Triassic sediments of Verhnekamskaya depression). *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii* (Problems of mineralogy, petrography and metallogeny). Collection of articles, Perm, 2004, No.6, pp. 64–66.
11. Chaikovsky I.I., Simakova Yu.S. *Chastinskaya grupa mestorozhdenii* (Chastinskaya group of deposits). *Geologicheskie pamyatniki Permskogo kraia* (Geological memorials of Perm region), Encyclopedia. Mining institute of UB RAS, Perm, 2009, pp. 329–334.
12. Chaikovsky I.I., Kalinina T.A., Korotchenkova O.V., Chirkova E.P. *Evaporitovye mestorozhdeniya permskogo Prikamya i ih mineralnye assotsiatsii* (Evaporite deposits of Permian Kama region and their mineral associations). *Mestorozhdeniya kamnesamotsvetnogo i nerudnogo syrya razlichnykh geodinamicheskikh obstanovok* (Deposits of precious stone and non-ore raw from various geodynamic environments). Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset, 2015, pp. 201–206.
13. Chaikovsky I. I., Trapeznikov D. E., Chirkova E. P., Kablinov O. S., Ivanov O. V. *Novaya epigeneticheskaya poroda Verhnekamskogo mestorozhdeniya solei: strukturnaya pozitsiya, sostav i gazonosnost* (New epigenetic rocks from Verhnekamskoe salt deposit: structural position, composition and gas content). *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii* (Problems of mineralogy, petrography and metallogeny). Collection of articles, Perm, 2016, No. 19, pp. 379–386.
14. Chaikovsky I. I., Chirkova E. P., Trapeznikov D. E. *Kaolinit, goyatsit i gidroksidy alyuminiya — novye vysokoglinozemistye mineraly Verhnekamskogo mestorozhdeniya* (Kaolinite, goyazite and hydroxides of aluminum — new clay minerals of Verhnekamskoe deposit). *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala* (Geology and mineral resources of Western Urals), collection of articles, Perm, 2016, No. 19, pp. 94–97.
15. Chaikovsky I. I., Korotchenkova O. V. *Novye hloridno-alyuminiisoderzhaschie mineraly Verhnekamskogo mestorozhdeniya solei* (New chlorine and aluminum containing minerals of Verhnekamskoe salt deposit). *Vestnik of Perm University. Geologiya*, No. 2(31), 2016, pp. 6–13.
16. Chirkova E. P., Chaikovsky I. I. *O roli sulfat-redukcii v mineraloobrazovanii na Verhnekamskom mestorozhdenii solei* (Role of sulphate-reduction in mineral formation at Verhnekamskoe salt deposit). *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii* (Problems of mineralogy, petrography and metallogeny). Collection of articles, Perm, 2012, No. 15, pp. 79–84.
17. Yahontova L. K., Zvereva V. P. *Osnovy mineralogii gipergeneza* (Basics of hypergenesis mineralogy). Vladivostok: Dalnauka, 2000, 331 pp.
18. Bopp L., Ehrlich H. Enzymatic reduction of Cr⁶⁺ by a strain of *Pseudomonas fluorescens*. *Abstr. annu. meet. amer. soc. microbial*. Washington, D. C., 1980, pp. 212–216.
19. Milton C., Appleman D. E., Appleman M. H. et al. Merumite, a complex assemblage of chromium minerals from Guyana. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 1976, No. 887, pp. 1–29.
20. Scheck J., Lemke T., Gebauer D. The role of chloride ions during the formation of akaganite revisited. *Minerals*, 2015, 5(4), pp. 778–787.

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД ПИЖЕМСКОЙ СВИТЫ ВЕРХНЕГО РИФЕЯ НА ВОЗВЫШЕННОСТИ ОЧПАРМА (ЮЖНЫЙ ТИМАН)

Н. Ю. Никулова

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

nikulova@geo.komisc.ru

Приведены результаты изучения вещественного состава метатерригенных пород среднего рифея Южного Тимана. Изучение литологических и геохимических характеристик песчано-сланцевой толщи позволило установить, что ее образование проходило на континентальном шельфе в условиях мелководного бассейна со слабой гидродинамикой и сезонными изменениями климата. В составе пород преобладают рециклированные обломки, переотложенные из древних метасадочных толщ, присутствуют слабоизмененный вулканомиктовый и пирокластический материал.

Ключевые слова: рифей, метатерригенные породы, вещественный состав, обломочный материал, условия осадконакопления.

LYTHOLOGICAL AND CHEMICAL COMPOSITION AND DEPOSITIONAL CONDITIONS OF THE MIDDLE RIPHEAN METACLASTIC ROCKS IN THE OCHPARMA UPLAND (SOUTH TIMAN)

N. Y. Nikulova

Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The results of studying the composition of the Middle Riphean metaclastic rocks from the South Timan are summarized in the article. Lithological features and geochemical parameters of sandy shales allow us to conclude that sedimentation occurred on the continental shelf in a shallow marine basin with weak hydrodynamic regime and seasonal climate variations. Sandy interlayers are dominated by mineral and rock fragments redeposited from eroded older metasedimentary rocks. They also contain slightly altered volcanic and pyroclastic material.

Keywords: Riphean, metaclastic rock, composition, clastic material, sedimentation conditions.

Введение

В среднем течении р. Воль на возвышенности Очпарма находится один из немногочисленных в юго-восточной части Тиманского кряжа естественных выходов рифейских пород (рис. 1).

В геологическом строении этой возвышенности принимают участие средне-, верхнерифейские и палеозойские образования¹. Рифейские отложения, выведенные на поверхность в пределах Вольской тектонической зоны на юго-востоке возвышенности Очпарма, представлены среднерифейскими клеоновской (RF_2kl), пижемской (RF_2p) свитами и вымской (RF_2vm) серией, верхнерифейские – павьюгской (RF_3pv) и паундской (RF_3pn) свитами (рис. 2). В объяснительной записке к геологической карте отложения пижемской свиты описаны как однородная толща темно-серых кварц-серицит-хлоритовых сланцев, содержащих порфиобласты сидерита, с тонкими (1–2 мм) прослойками кварцитопесчаников. Рифейские отложения с угловым несогласием перекрыты терригенными и карбонатными образованиями верхнего девона, на закарстованной поверхности которых со стратиграфическим несогласием залегают каменноугольные отложения.

Рифейские отложения на Среднем Тимане являются вмещающими для многочисленных метасоматических редкометалльно-редкоземельных рудопроявлений, обусловленных внедрением ордовикских щелочных и основных интрузивных образований, а изучение разреза на р. Воль позволяет охарактеризовать исходные, не затронутые метасоматическими процессами породы.



Рис. 1. Расположение разреза (1)

Fig. 1. Section location (1)

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются метатерригенные отложения пижемской (RF_2p) свиты среднего рифея, описанные и опробованные в естественном обнажении в среднем течении р. Воль (рис. 2). Отложения упомянутой свиты вскрыты на правом берегу реки на протяжении около 30 м. Азимут падения слоев 75° , угол падения 35° . Целью

¹Описание геологического строения района приводится по Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1:200 000, серия Тиманская, лист Р-39-ХVIII. 1991 г.

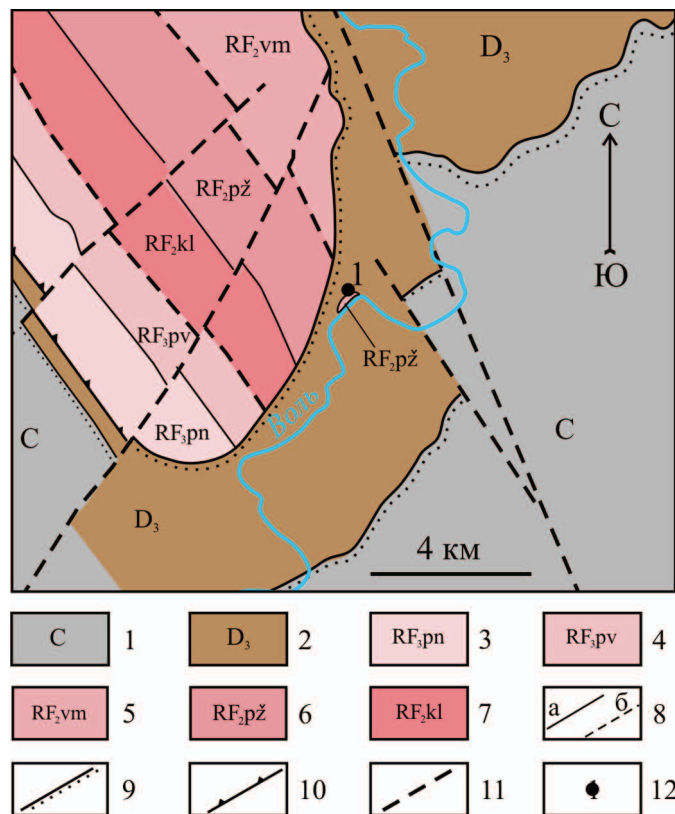


Рис. 2. Схематическая геологическая карта возвышенности Очпарма (по Н. В. Опаренкову, 1991 г.). 1, 2 — палеозой: 1 — каменноугольная система (глины, аргиллиты, алевролиты, известняки, доломиты), 2 — девонская система, верхний отдел (алевролиты, глины, песчаники, известняки, доломиты); 3, 4 — верхний рифей: 3 — павьюгская свита (доломиты), 4 — паундская свита (сланцы кварц-серицит-хлоритовые, известковистые, доломиты, известняки); 5–7 — средний рифей: 5 — клеоновская свита (алевролиты и сланцы серицит-хлоритовые, кварцевые и хлорит-серицит-кварцевые), 6 — пижемская свита (сланцы хлорит-серицит-кварцевые), 7 — вымская серия (переслаивание сланцев серицит-хлорит-кварцевых, хлорит-кварцевых, углисто-серицит-кварцевых и кварцитов); 8, 9 — границы между стратиграфическими подразделениями: 8 — согласные (а — достоверные, б — предполагаемые), 9 — несогласные; 10, 11 — разломы предполагаемые: 10 — взбросо-надвиги, 11 — другие разломы; 12 — местоположение изученного разреза

Fig. 2. Schematic geological map of Ochparma uplift (according to N. V. Oparenkov, 1991). 1, 2 — Paleozoic: 1 — Carboniferous system (clays, argillites, aleurolites, limestones, dolomites), 2 — Devonian system, upper section (aleurolites, clays, sandstones, limestones, dolomites); 3–4 — Upper Riphean: 3 — pavyugskaya suite (dolomites), 4 — paundskaya suite (quartz-sericite-chlorite, calcareous shales, dolomites, limestones); 5–7 — Middle Riphean: 5 — kleonovskaya suite (aleurolites and sericite-chlorite, quartz and chlorite-sericite-quartz shales), 6 — pizhemskaia suite (chlorite-sericite-quartz shales), 7 — vymskaya series (interbedding of sericite-chlorite-quartz, chlorite-quartz, carbonaceous sericite-quartz shales and quartzites); 8, 9 — boundaries between stratigraphic units: 8 — conformable (a — reliable, b — prospective), 9 — unconformable; 10, 11 — prospective faults: 10 — overthrust reversed faults, 11 — other faults; 12 — studied section

изучения данной свиты является выяснение особенностей вещественного состава пород, установление источников и способов поступления обломочного материала, условий осадконакопления и характера постдиагенетических преобразований, определивших современный облик толщи.

Петрографический состав пород пижемской свиты изучен в шлифах. Выделенная по стандартной методике (дробление, разделение) тяжелая фракция протоличных

проб просматривалась под биноклем. Микронзондовый анализ проводился на сканирующем электронном микроскопе JSM-6400 с энергетическим спектрометром Link (оператор В. Н. Филиппов). Фазовый состав пород был определен при помощи рентгенодифрактометрического анализа неориентированных образцов (дифрактометр Shimadzu XRD-6000, CuK α -излучение, 30 kV/30 mA, оператор к. г.-м. н. Ю. С. Симакова). Содержания породообразующих оксидов определены весовым химическим методом в лаборатории Института геологии Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Интерпретация результатов химических анализов проведена с помощью известных методик, позволяющих установить генетическую принадлежность пород, источники терригенного материала и условия накопления отложений [2–4, 7, 8, 11–17].

Особенности строения и литолого-геохимическая характеристика терригенных пород

Пижемская свита представляет собой тонкое чередование темно-серых сланцев и тонкозернистых песчанников или алевролитов (рис. 3, а). Для сланцевых слоев, сложенных микронзернистым агрегатом кварца, полевого шпата, серицита и хлорита, характерны микролепидогранобластовая структура и сланцеватая текстура. Песчано-алевритовые слои имеют гранобластовую структуру и содержат многочисленные полости ромбической формы, характерной для доломита. Часть из них пустые, некоторые частично, на периферии, а некоторые нацело выполнены буроватым микрокомковатым агрегатом гидроокислов железа (рис. 3, б). Ромбические полости, вероятно, появились в результате выщелачивания хемогенного доломита, образовавшегося синхронно или близко по времени к накоплению терригенной части породы. Крупные ромбы сложены более мелкими ромбическими индивидами и имеют конформные границы с окружающими обломочными зернами (рис. 3, в).

По данным А. А. Годовикова, «прямое осаждение доломита... может происходить лишь в отшнуровавшихся от моря замкнутых бассейнах в условиях сухого жаркого климата, повышающего до необходимой концентрации различных солей...» [1, с. 444]. В стадии катагенеза доломит был растворен элизонными водами, отжатыми из глинистых слоев, и частично замещен гидроокислами железа.

Акцессорные минералы в шлифах редки. Они представлены мельчайшими зернами циркона, эпидота и турмалина. Минералогический анализ тяжелых фракций протоличных проб показал присутствие кроме перечисленных выше минералов единичных окатанных зерен граната и кубических кристаллов пирита. В образце В-4 обнаружено зерно, состоящее из двух шариков самородного железа, заключенных в тонковолокнистую скрытокристаллическую с раковистым изломом основную массу (рис. 3, г), представляющую собой тонкую механическую смесь неиндивидуализируемых минеральных фаз с общим составом (по результатам четырех анализов): SiO₂ 11.47–32.66, TiO₂ 19.29–56.05, Al₂O₃ 3.95–11.47, Fe₂O₃ 6.70–10.36, MgO 2.97–4.84, CaO 2.42–8.04, Na₂O 1.13–2.82, K₂O 2.06–5.34, MnO 10.85–13.36 (мас. %).

Содержания главных породообразующих оксидов, литохимические модули, химические индексы и индикаторные соотношения, применяемые при реконструкциях условий образования отложений и использованные

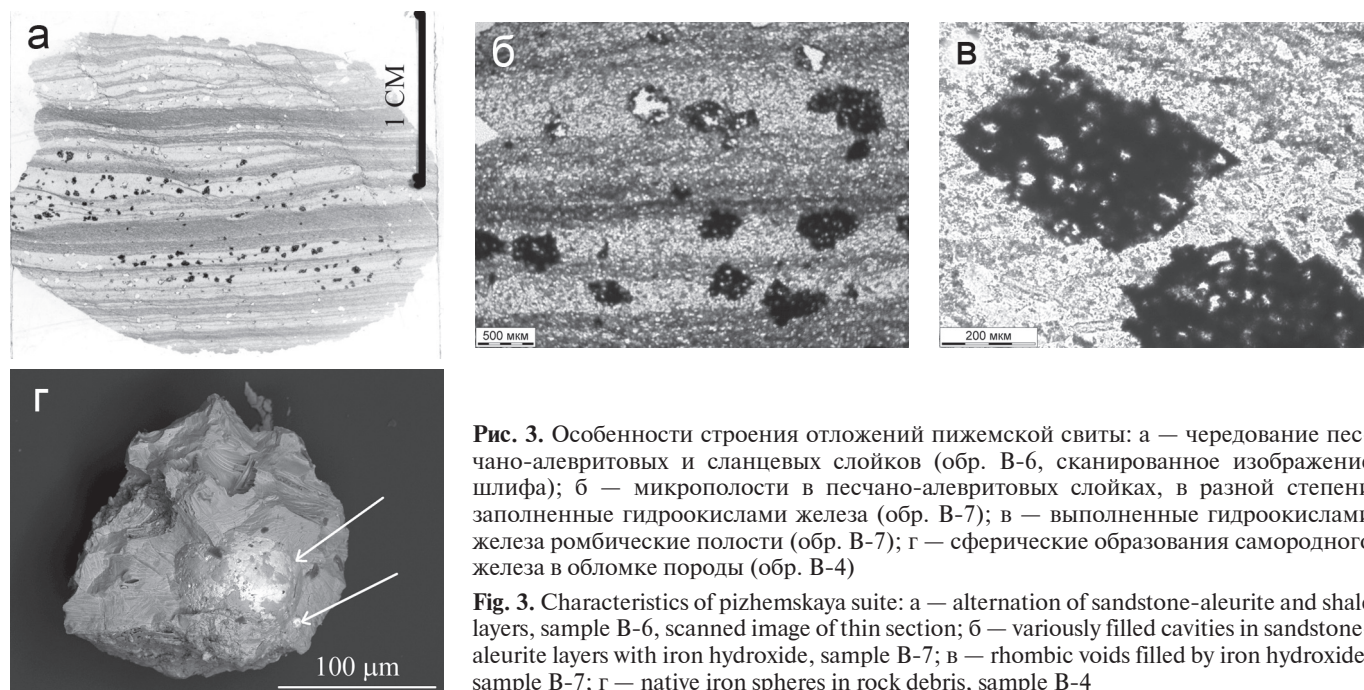


Рис. 3. Особенности строения отложений пижемской свиты: а — чередование песчано-алевритовых и сланцевых слоев (обр. В-6, сканированное изображение шлифа); б — микрополости в песчано-алевритовых слоях, в разной степени заполненные гидроксидами железа (обр. В-7); в — выполненные гидроксидами железа ромбические полости (обр. В-7); г — сферические образования самородного железа в обломке породы (обр. В-4)

Fig. 3. Characteristics of pizhemskaia suite: а — alternation of sandstone-aleurite and shale layers, sample B-6, scanned image of thin section; б — variously filled cavities in sandstone-aleurite layers with iron hydroxide, sample B-7; в — rhombic voids filled by iron hydroxide, sample B-7; г — native iron spheres in rock debris, sample B-4

при построении соответствующих диаграмм, приведены в таблицах 1 и 2.

По результатам нормативного минерального подсчета породы в среднем содержат (об. %): кварц — 34.2, мусковит — 23.9, кислый (№1) плагиоклаз — 18.5, хлорит — 14.5, калиевый полевой шпат — 5.6, гематит — 2.6, лейкоксен — 1, апатит — 0.3, титанит — 0.2 и доломит — 0.2.

На классификационной диаграмме $\log(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{K}_2\text{O}) - \log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ [15] фигуративные точки пород пижемской свиты попали в поле глинистых сланцев (рис. 4, а). По показателю нормированной щелочности (значению НКМ, эквиваленту коэффициента Миддлтона [17]), превышающему пороговое значение 0.3, все фигуративные точки, за исключением точек обр. 2, расположены в области пород, в составе которых, по мнению Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис [8], имеется неизменный калиевый полевой шпат, то есть присутствует вулканогенная примесь (табл. 2; рис. 4, б). Фемический модуль (ФМ), отражающий интенсивность выветривания и захоронения вещества, составляет 0.12–0.15 (табл. 2) и соответствует вулканокластическим грауваккам [7]. На классификационной диаграмме НКМ — ФМ (рис. 4, б), используемой для разделения пород, различающихся по составу глинистой фракции, фигуративные точки пород пижемской свиты попали в поле V, соответствующее осадкам хлорит-монтмориллонит-гидрослюдистого состава [8]. На диаграмме

K/Al — Mg/Al [20] точки расположены в области значений, свойственных породам, в составе которых преобладает иллит-мусковитоподобная диоктаэдрическая слюда и содержащих незначительную примесь каолинита (рис. 4, в). Рентгендифрактометрический анализ показал присутствие в породе диоктаэдрической слюды (мусковита) и железистого хлорита. Поскольку при построении обсуждаемой диаграммы не учитываются содержащиеся в породе железо и натрий, то она, соответственно, не отражает присутствие альбита и железистой составляющей хлорита, а небольшой сдвиг фигуративных точек в область каолинита связан, вероятно, с присутствием в породах продуктов разложения вулканического пепла. На треугольной диаграмме с вершинами ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) — ($\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{ППП}$) — ($\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O}$) [3] фигуративные точки составов пород располагаются в центральной части поля, соответствующего морским глинам и глинам засоленных лагун и озер аридной зоны, и одновременно на пересечении границ полей континентальных глин тропического и холодного климатов (рис. 4, г).

Значения CIA — индекса химического выветривания, показателя климата в области размыва [18] — около 70, что указывает на среднюю степень переработки материала на палеоводосборах в условиях теплого климата (табл. 2). Индекс выветривания CIW [14] 82–83 также со-

Таблица 1. Содержание породообразующих оксидов, мас. %
Table 1. Content of rock-forming oxides, wt. %

N п/п	N обр. N sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП poi	Сумма Total
1	1	61.99	0.86	17.95	3.06	4.26	0.058	1.73	0.40	1.93	3.70	0.092	4.29	100.32
2	2	61.18	0.84	18.04	3.45	4.09	0.039	1.74	0.40	1.69	3.76	0.140	4.38	99.75
3	3	63.12	0.91	17.93	2.78	3.93	0.049	1.56	0.30	1.91	3.79	0.065	3.98	100.32
4	4	61.78	1.03	19.04	2.57	3.69	0.032	1.54	0.40	1.87	4.18	0.059	4.19	100.38
5	5	64.07	0.86	17.89	1.85	4.63	0.051	1.50	0.30	2.04	3.64	0.061	3.41	100.30
6	6	63.21	0.95	18.49	1.94	4.22	0.052	1.43	0.40	1.95	4.06	0.083	3.70	100.49
7	7	63.08	0.86	17.85	2.88	3.94	0.053	1.52	0.40	1.87	3.65	0.069	4.02	100.19
8	9	63.90	0.88	17.86	1.91	4.68	0.059	1.53	0.30	1.96	3.59	0.076	3.59	100.34



Таблица 2. Литохимические модули и индикаторные соотношения
Table 2. Lithochemical modules and indicator ratios

N п/п	N обр.	$\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$	$\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$	HKM NPM	ФМ FM	F3	F4	K/Al	Mg/Al	CIA	CIW	ICV	Fe/Mn	(Fe+Mn)/Ti	Al/(Al+Fe+Mn)	$\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ППП}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	$\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	F1	F2
1	1	-0.08	0.54	0.31	0.15	-0.73	-0.93	0.17	0.06	69.39	82.14	0.86	135.02	11.85	0.61	15.67	18.81	65.69	0.21	-0.99	-6.65
2	2	-0.04	0.53	0.30	0.15	-0.98	-1.02	0.17	0.06	70.39	83.72	0.85	208.05	12.54	0.60	15.75	18.88	64.94	0.21	-0.83	-6.12
3	3	-0.13	0.55	0.32	0.13	-0.12	-0.63	0.17	0.05	69.68	82.94	0.82	146.42	10.25	0.63	14.46	18.84	66.91	0.21	-1.32	-6.57
4	4	-0.21	0.51	0.32	0.13	0.70	0.00	0.18	0.05	69.54	83.34	0.80	209.06	8.43	0.66	14.26	20.07	65.96	0.21	-1.38	-6.63
5	5	-0.29	0.55	0.32	0.13	-0.26	-0.88	0.16	0.05	69.50	82.09	0.78	133.27	10.29	0.64	13.73	18.75	67.71	0.22	-0.86	-7.38
6	6	-0.32	0.53	0.33	0.12	0.62	-0.35	0.18	0.05	68.91	82.45	0.78	124.80	8.90	0.66	13.64	19.44	67.27	0.20	-0.92	-7.07
7	7	-0.10	0.55	0.31	0.13	-0.57	-0.99	0.16	0.05	69.68	82.43	0.82	137.75	11.05	0.62	14.63	18.71	66.73	0.22	-1.29	-6.34
8	9	-0.27	0.55	0.31	0.13	-0.44	-0.83	0.16	0.05	69.97	82.57	0.78	117.23	10.24	0.64	13.97	18.74	67.49	0.20	-0.85	-7.15

Примечание: ГМ= $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}/\text{SiO}_2$; HKM = $\text{N}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$; TM = $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; ФМ = $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$; ЖМ = $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$, массовые проценты.

CIA = $100 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, ICV + $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Ca}_2\text{O} + \text{Mg}_2\text{O} = \text{TiO}_2)/\text{Al}_2\text{O}_3$ CIW = $100 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$, молекулярные количества.

Note: ГМ = $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}/\text{SiO}_2$; HKM = $\text{N}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$; TM = $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; ФМ = $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$; ЖМ = $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$, weight percent.

CIA = $100 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, ICV + $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Ca}_2\text{O} + \text{Mg}_2\text{O} = \text{TiO}_2)/\text{Al}_2\text{O}_3$ CIW = $100 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$, molecular quantities.

ответствует средней степени разложения исходных пород (табл. 2). Индекс изменения состава ICV [10] 0.78–0.86 характеризует породы как достаточно однородные, содержащие большое количество глинистых минералов (табл. 2). На диаграмме ICV – CIA [16] фигуративные точки занимают промежуточное положение между линиями, соответствующими составам размываемых основных и кислых пород (рис. 4, д). На диаграмме F3 – F4 [19] точки пород пижемской свиты расположены в полях изверженных пород среднего и основного составов вблизи границы с областью богатых кварцем осадочных образований (рис. 4, е).

Значения соотношения Fe/Mn — фациального индикатора для осадочных отложений [2] — соответствуют отложениям, сформированным в прибрежно-морских условиях с доминированием терригенного материала (табл. 2). Титановый модуль (Fe + Mn)/Ti [5] в интервале 8.43–11.85 и алюминиевый модуль Al/(Al + Fe + Mn) [12] в интервале 0.61–0.66 характеризуют породы как не содержащие примесь эксгальвативного материала (табл. 2). Значения калиевого модуля $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [13] 0.2–0.22 соответствуют породам, сформированным преимущественно за счет рециклированного материала (табл. 2).

Для отражения зависимости содержания и соотношения петрогенных оксидов от палеогеодинамической обстановки формирования отложений использованы диаграммы (рис. 5), при построении которых учитывается максимальное количество оксидов [19, 10]. На обеих диаграммах фигуративные точки пород пижемской свиты попали в поля активных континентальных окраин.

Обсуждение результатов

Анализ полученных данных позволяет предположить существование нескольких источников обломочного материала. Накопление рассматриваемых отложений, вероят-

но, проходило за счет размыва и переотложения как метаморфических пород древнего континента, так и образований протоуралид-тиманид. Выявленные петрохимические особенности, однако, свидетельствуют о преобладании рециклированного обломочного материала метаморфических пород древнего континента. На это указывают, в частности, значения калиевого ($\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) модуля. Но при этом значении модуля нормированной щелочности (HKM), учитывающего также содержание натрия, дают основания предполагать присутствие в породах незначительного количества слабоизмененного вулканокластического материала. В качестве подтверждения такого присутствия можно рассматривать обнаруженный в протоочной пробе обломок, содержащий сферические образования самородного железа и имеющий, очевидно, пирокластическое происхождение. Подобные железные сферулы, приросшие к стенкам пустот (газовых полостей) основных, средних и кислых эффузивов, известны в пределах современных высокотемпературных гидротермальных систем Камчатки и Курильской гряды [4]. Сферулы (в ассоциации со стекловатыми и рудными шлакоподобными частицами) описаны в explosивно-кластических фациях взрывных структур Украинского щита, в разновозрастных туфоидных и вулканогенно-осадочных отложениях Волыни, Предкарпатья, Карпат и Крыма [9]. Проявлению вулканической активности сопутствовало образование в среднем рифе основных интрузий вдоль зоны Центрально-Тиманского разлома, а рубеж 1100 млн лет, зафиксированный магматическими породами основного состава Северного Тимана, является началом магматизма не только на данной территории, но и во всем регионе [6].

На диаграммах, позволяющих установить палеогеодинамическую обстановку формирования пород (см. рис. 5), расположение фигуративных точек в полях активных континентальных окраин обусловлено тем, что одним из источ-

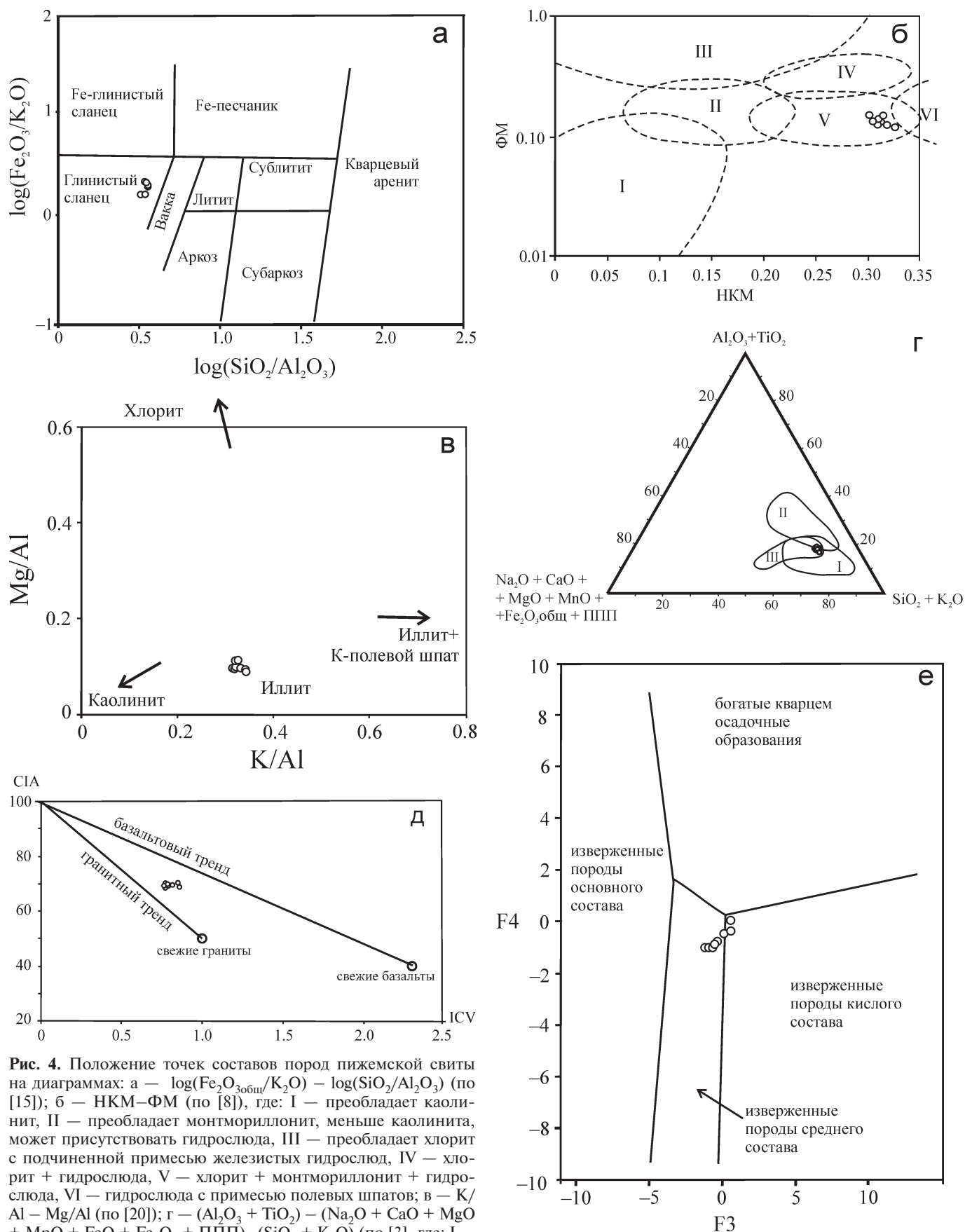


Рис. 4. Положение точек составов пород пижемской свиты на диаграммах: а — $\log(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{K}_2\text{O}) - \log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ (по [15]); б — НКМ–ФМ (по [8]), где: I — преобладает каолинит, II — преобладает монтмориллонит, меньше каолинита, может присутствовать гидрослюда, III — преобладает хлорит с подчиненной примесью железистых гидрослюдов, IV — хлорит + гидрослюда, V — хлорит + монтмориллонит + гидрослюда, VI — гидрослюда с примесью полевых шпатов; в — $\text{K}/\text{Al} - \text{Mg}/\text{Al}$ (по [20]); г — $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{ППП}) - (\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O})$ (по [3], где: I — морские глины и глины засоленных лагун и озер аридной зоны; II — континентальные глины тропического климата; III — континентальные глины холодного и умеренно-холодного климата; д — ICV — CIA (по [16]); е — F3 — F4 (по [19])

Fig. 4. Location of composition points of enganepeyskaya suite: а — $\log(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{ген}}/\text{K}_2\text{O}) - \log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ [15]; б — NPM–FM [8] where: I — kaolinite dominated, II — montmorillonite dominated, less kaolinite, hydromica may be present, III — chlorite dominated,

with secondary admixture of glandular hydromica, IV — chlorite + hydromica, V — chlorite + montmorillonite + hydromica, VI — hydromica with admixture of feldspars; в — $\text{K}/\text{Al} - \text{Mg}/\text{Al}$ ([3]); г — $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{poi}) - (\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O})$ ([3]), where: I — marine clays and clays of saline lagoons and lakes in arid zone; II — continental clays of tropical climate; III — continental clays of cold and moderately cold climate; д — ICV–CIA ([16]); е — F3 — F4 ([19])

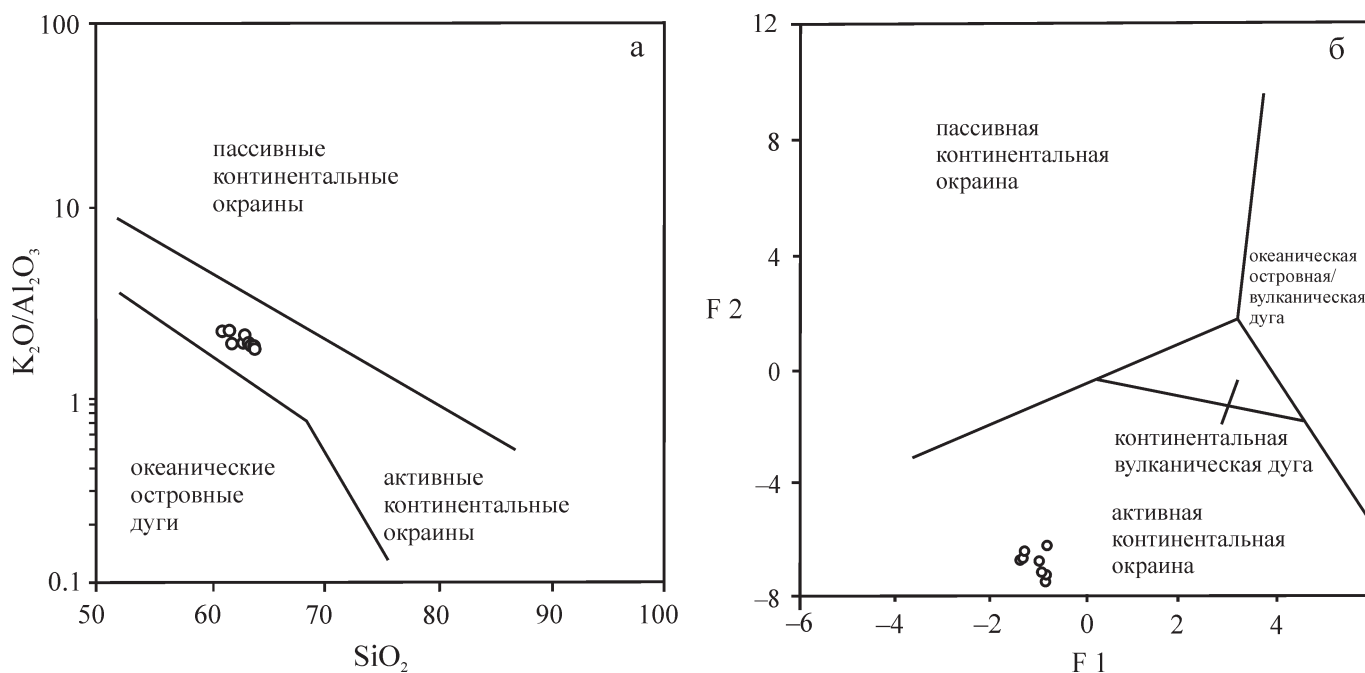


Рис. 5. Положение точек составов пород пижемской свиты на диаграммах: а — SiO_2 – $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (по [19]; б — F1 – F2 (по [10])
Fig. 5. Location of composition points of pizhemskaia suite: а — SiO_2 – $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ([19]; б — F1 – F2 ([10])

ников обломочного материала были разрушающиеся магматические и метаморфические породы древних комплексов фундамента Восточно-Европейской платформы, развитые в области питания. В состав этих комплексов входили в том числе образования активных континентальных окраин и коллизионных орогенов [11].

На треугольной диаграмме $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{ППП}) - (\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O})$ [3], используемой для диагностики генетического типа отложений, фигуративные точки находятся в области перекрытия полей морских глин и глин засоленных лагун и озер аридной зоны, континентальных глин тропического климата и континентальных глин холодного и умеренно-холодного климата. Вариант холодного и умеренного холодного климата отпадает, так как значения индекса CIA около 70 указывают на то, что осадки формировались в обстановке теплого климата. Для континентальных глин тропического пояса характерно преобладание каолинита, т. е. на диаграмме ФМ–НКМ соответствующие точки должны были попасть в поле I и располагаться в левой нижней части диаграммы $\text{K}/\text{Al} - \text{Mg}/\text{Al}$ (рис. 4, б, в). Для гумидного тропического климата характерно отсутствие дифференциации химически зрелого осадка, а наблюдаемая в изученных породах слоистость указывает на цикличность поступления средневыветрелого материала, выраженную изменениями гранулометрического и минерального составов. Индикатором аридного климата является доломит. В пользу того, что ромбические полости могли принадлежать доломиту, свидетельствует их специфическая форма, предполагающая присутствие только ромбоэдров. Наиболее вероятно, что областью образования изученных пород был мелководный водоем, располагавшийся в аридной климатической зоне.

Закключение

Анализ петрохимических коэффициентов, используемых в качестве индикаторов при палеогеографических реконструкциях, показал, что образование отложений пижемской свиты возвышенности Очпарма проходило в аридном

климате в условиях мелководного бассейна с незначительными, вероятно сезонными, колебаниями уровня. В относительно холодные и влажные периоды накапливались преимущественно глинисто-слюдистые с примесью алевроитового материала слои, в жаркие сезоны – более грубозернистые слои, а превышение испарения над стоком привело к образованию в них сингенетичного доломита. Обломочная часть пород сформирована из фрагментов метаосадочных и магматических пород фундамента древнего континента, слабоизмененного полевошпатового материала более молодых вулканитов протоуралит-тиманид, располагавшихся, судя по степени изменения, на небольшом удалении, а также незначительной примеси обломков пирокластического происхождения. Накопление осадка на континентальном шельфе сопровождалось эпизодом вулканической активности, связанной с эпиконтинентальным рифтогенезом. Преобразование вещественного состава отложений происходило под влиянием многостадийных постдиагенетических процессов – растворения, трансформации, аутигенного минералообразования и перекристаллизации, приведших к формированию их современного облика.

Литература

1. Годовиков А. А. Минералогия. М.: Недра, 1975. 520 с.
2. Розен О. М., Журавлев Д. З., Ляпунов С. М. Геохимические исследования осадочных отложений Тимано-Печерской провинции // Разведка и охрана недр. 1994. № 1. С. 18–21.
3. Ронов А. Б., Хлебникова З. В. Химический состав важнейших генетических типов глин // Геохимия. 1961. № 6. С. 449–469.
4. Рычагов С. Н., Главатских С. Ф., Сандимирова Е. И. Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры, флюидного режима и минералорудообразования в современной гидротермальной системе Баранского (о-в Итуруп) // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 31–40.
5. Страхов Н. М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М.: Наука, 1976. 300 с.



6. Тиманский кряж. Т. 2. Литология и стратиграфия, геофизическая характеристика земной коры, тектоника, минерально-сырьевые ресурсы: Монография. Ухта: УГТУ, 2010. 437 с.
7. Юдович Я. Э., Гареев Э. З., Кетрис М. П. Природа аномальных накоплений калия в глинистых породах // Геохимия. 1991. № 5. С. 689–700.
8. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
9. Бекеша С., Яценко І, Білик Н., Дацюк Ю., Дручок Л. Особливості хімічного складу силікатних мікросферул із експлозивних та вулканогенно-осадових формацій України // Мінерал. збірник. 2011. № 61. Вип. 1–2. С. 134–145.
10. Bhatia M. R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // The Journal of Geology. 1983. V. 91. № 6. P. 611–627.
11. Bogdanova S. V., Bingen B., Gorbatshev R. et al. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // Precam. Res. 2008. V. 160. P. 23–45.
12. Bostrom K. The origin and fate of ferromanganoan active ridge sediments // Stockholm Contrib. Geol. 1973. V. 27. No. 2. P. 148–243.
13. Cox R., Lowe D. R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review // J. Sed. Res. 1995. V. 65. P. 1–12.
14. Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering // Sed. Geol. 1988. V. 55. No. 3/4. P. 319–322.
15. Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // J. Sed. Petrol. 1988. V. 58. P. 820–829.
16. Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea // Sedimentary Geology. 2002. V. 149. P. 219–235.
17. Middleton G. V. Chemical composition of sandstones // Geological Society of America Bulletin. 1960. V. 71. P. 1011–1026.
18. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. V. 299. P. 715–717.
19. Roser B. P., Korsch R. J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio // The Journal of Geology. 1986. V. 94. № 5. P. 635–650.
20. Tugeon S., Brumsack H.-J. Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian-Turonian boundary events (Cretaceous) in the Umbria-March Basin of central Italy // Chem. Geol. 2006. V. 234. P. 321–339.
4. Rychagov S. N., Glavatskich S. F., Sandimirova E. I. *Rudnye i silikatnye magnitnye schariki kak indikator struktury, flyidnogo regima i mineraloobrasovaniya b sovremennoy gidotermalnoisisteme baranskogo (o-b Iturup)* (Ore and silicate magnetic beads as indicators of structure and fluid regime and mineral formation in the modern hydrothermal system of Baransky (Iturup island)). Geologiya rudnykh mestorogdeniy, 1996, V. 38, No. 1, pp. 31–40.
5. Strachov N. M. *Problemy geochemii sovremennogo okeanskogo litogeneza* (Problems of Geochemistry of modern oceanic lithogenesis). Moscow: Nauka, 1976, 300 p.
6. Timansky kryag (Timan ridge). V. 2. *Litologiya i stratigrafiya, geofizicheskaya charakteristika Zemnoy kory, tektonika, mineralno-syryevye resursy* (Lithology and stratigraphy, geophysical characterization of the Earth's crust, tectonics, mineral resources). Ukhta, 2010, 437 p.
7. Yudovich Ya. E., Gareev E. Z., Ketris M. P. *Pripoda anomalnykh nakopleniy kaliya v glinistych porodach* (The nature of the anomalous accumulation of potassium in clay rocks). Geochemistry, 1991, No. 5, pp. 689–700.
8. Yudovich Y. E., Ketris M. P. *Osnovy litohimii* (Basics of lithochemistry). St. Petersburg: Science, 2000, 479 p.
9. Bekesha S., Yatsenko I., Bilyk N., Datsyuk Y., Druchok L. *Osoblivosti chimichnogo skladu silikatnykh mikrosferul is eksplosivnykh ta vukanogenno-osadovykh formaziy Ukrainy* (The features the chemical composition of silicate microspheres from explosive and volcanogenic-sedimentary formations of Ukraine). Mineralogical collection, 2011, No. 61, Vol. 1–2, pp. 134–145.
10. Bogdanova S. V., Bingen B., Gorbatshev R. et al. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia. Precam. Res. 2008, V. 160, pp. 23–45.
11. Bhatia M. R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones. The Journal of Geology, 1983, V. 91, No. 6, pp. 611–627.
12. Bostrom K. The origin and fate of ferromanganoan active ridge sediments. Stockholm Contrib. Geol, 1973, V. 27, No. 2, pp. 148–243.
13. Cox R., Lowe D. R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review. J. Sed. Res, 1995, V. 65, pp. 1–12.
14. Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering. Sed. Geol. 1988. V. 55. No. 3-4. pp. 319–322.
15. Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. J. Sed. Petrol. 1988. V. 58. pp. 820–829.
16. Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea. Sedimentary Geology, 2002, V. 149, pp. 219–235.
17. Middleton G. V. Chemical composition of sandstones. Geological Society of America Bulletin, 1960, V. 71, pp. 1011–1026.
18. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 1982, V. 299, pp. 715–717
19. Roser B. P., Korsch R. J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. The Journal of Geology. 1986, V. 94, No. 5, pp. 635–650.
20. Tugeon S., Brumsack H.-J. Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian-Turonian boundary events (Cretaceous) in the Umbria-March Basin of central Italy. Chem. Geol. 2006, V. 234, pp. 321–339.

References

1. Godovikov A. A. *Mineralogia* (Mineralogy). Moscow: Nedra, 1975, 520 p.
2. Rozen O. M., Guravlev D. Z., Lyapunov S. M. *Geochemicheskie issledovaniya osadochnykh otlogov Timano-Pechorskoj provincii* (Geochemical studies of sedimentary deposits in the Timan-Pechora province). Razvedka i ochrana neдр, 1994, No. 1, pp. 18–21.
3. Ronov A. B., Chlebnikova Z. V. *Chimicheskiy sostav vagneyschich geneticheskikh tipov glin* (Chemical composition of the main genetic types of clays). Geochimiya. 1961, No. 6, pp. 449–469.



СТАТИСТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПУЗЫРИСТОСТИ ЛАВ ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ НА КАМЧАТКЕ

А. С. Мяндин¹, К. В. Тарасов²

¹Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар
anremand@gmail.com

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский
belfast@kscnet.ru

Исследования, посвященные современному вулканизму, почти не затрагивают такое свойство вулканических лав, как пузыристость. В нашей статье приводятся первые результаты изучения пузыристости продуктов трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. Были использованы планиметрические методы анализа горных пород по их изображениям и проведены статистические расчеты. В результате выявлены пять типов лав: от наименее пористых — плотных к наиболее пористым — шлакообразным. Преобладающим типом лав является пористо-пузыристый с совокупным объемом полостей в 30–55 %. Со степенью пористости-пузыристости прямо коррелирует размер пустот и степень их удлинения.

Ключевые слова: Толбачик, извержение вулкана, пористость-пузыристость лав.

STATISTICAL CHARACTERISTIC OF POROSITY IN LAVAS OF TOLBACHIK FISSURE ERUPTION, KAMCHATKA

A. S. Myandin¹, K. V. Tarasov²

¹Syktvykar State University named after Pitirim Sorokin, Syktvykar
anremand@gmail.com

²Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky
belfast@kscnet.ru

At present, works, devoted to modern volcanism, hardly affect such a property of volcanic lavas as bubbling. In this article the first results of the study of the bubbling properties of the products of the Tolbachik Fissure Eruption 2012–2013 are given. Planometric methods for analyzing rocks from their images were used and statistical calculations were made. As a result, five types of lavas were identified — from the least porous — dense to the most porous scoria. The type of lava is porous-vesicular with a cumulative volume of cavities of 30–55 %. With increasing porosity-vesicularity, the size of the voids and the degree of their elongation are directly correlated.

Keywords: Tolbachik, volcanic eruption, porosity-vesicular lava.

Введение

Важным, но практически не изученным свойством излившихся вулканических пород является их пузыристость, то есть насыщенность пустотами разных форм и размеров. Очевидно, что эти пустоты образовались в результате дегазации еще жидких лав, а вариации формы и размеров пустот определяются динамикой лав и скоростью их остывания. Пузыристость свойственна не только современным эффузивам, но и их палеоаналогам, известным как миндалекаменные базальты и андезибазальты. Возможно, результаты изучения полостей в современных эффузивах позволят судить об условиях, при которых сформировались их палеоаналоги. Цель нашей работы — выявить закономерности изменения свойств пустот в лавах последнего извержения Плоского Толбачика 2012–2013 гг.

Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии (ТТИ-50) произошло в период с 27 декабря 2012 г. по 9 октября 2013 г. на юго-юго-западном склоне вулкана Плоский Толбачик. Сначала лава изливалась из двух трещин длиной по 500 м, открывшихся на высоте 2100 м. Затем извержение сосредоточилось в двух центрах: в верхнем — прорыве им. Меняйлова и нижнем — прорыве им. Набоко. Через пять дней прорыв Меняйлова прекратил свою активность, и до конца извержения действовал только прорыв Набоко.

В процессе ТТИ-50 образовалось три крупных лавовых поля: Водопадное, Ленинградское и Толуд [1].

Объекты и методы исследований

Исследованию подверглись 45 штучных образцов, отобранных авторами с лавовых полей ТТИ-50 и переданных для исследований Г. А. Карповым (рис. 1). Анализ проводился по шлифам размером 36 × 54 мм с использованием металлографических методов изучения планиструктуры [3] и приемов количественного анализа горных пород по их изображениям [4]. Совокупная пористость-пузыристость лав определялась методом случайных секущих. Размер отдельных пустот оценивался полусуммой их максимального и минимального измерения в шлифе. В качестве характеристики формы пустот использовалось отношение максимального измерения к минимальному (коэффициент удлинения, или анизометричности). Статистический анализ данных ограничивался расчетом среднего арифметического ($\bar{X}$), стандартного отклонения (S_x) и коэффициента вариации ($V_x, \%$).

Результаты исследований

Проведенные исследования показали, что в исследуемых лавах (рис. 2, 3) содержание пустот варьируется от 2.5 до 83 %, а размеры пустот изменяются в пределах 15–

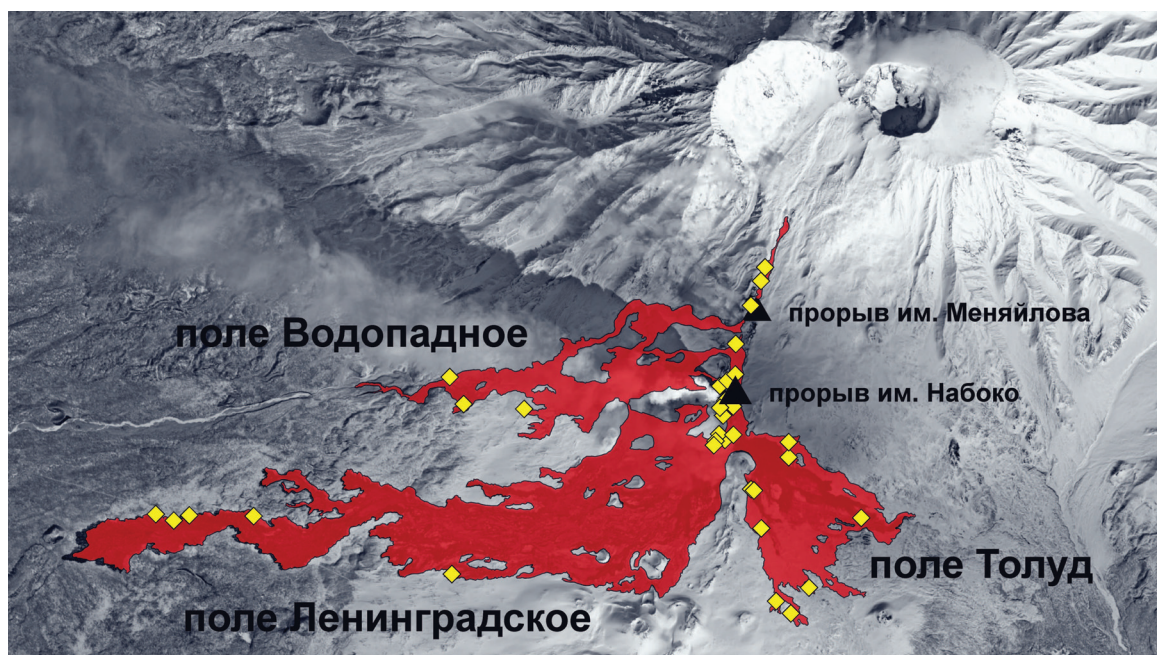


Рис. 1. Схема лавовых потоков ТФИ-50 и точки отбора образцов. Контурные потоков по [1]
Fig. 1. Schematic map of TFE-50 lava flows and samples location. Contours of flows by [1]

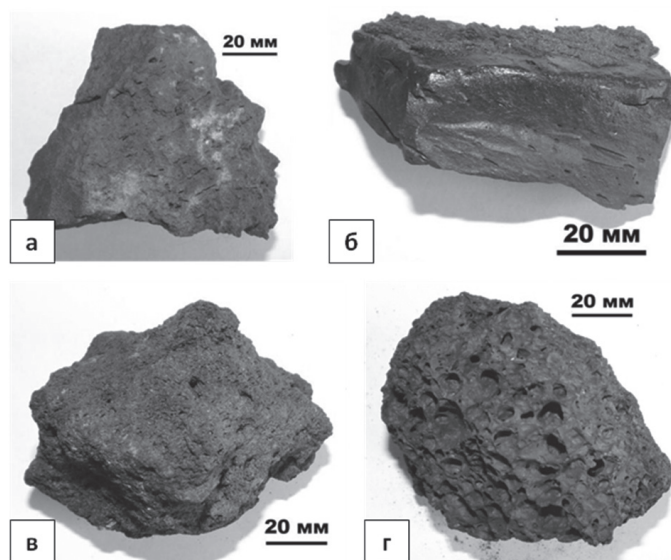


Рис. 2. Фотографии штучных образцов разных типов лав ТФИ-50: а — плотные; б — пористые; в — пористо-пузыристые; г — пузыристые (шлаки)

Fig. 2. Photos of specimens of TFE-50 different lava types: а — massive type, б — porous type, в — porous-vesicular type, г — scoria

7850 мкм. По форме пустоты изменяются от изометричных до очень сильно вытянутых, на что указывает широкий разброс коэффициента удлинения — от 1 до 28. На основании полученных данных мы разделили исследованные вулканиды на пять типов (см. таблицу): плотные (пористость < 5 %), пористые (5–10 %), пузыристо-пористые (10–30 %), пористо-пузыристые (30–55 %) и пузыристые шлаковидные (> 55 %).

В плотных лавах поры распределены довольно равномерно, их средний размер составляет 184 мкм, средний коэффициент удлинения — 2.2. В этом типе лав наблюдается наименьшая вариация коэффициента удлинения ($V_x = 40.9$ %).

Средний размер пустот в пористых лавах составляет 481 мкм, а средний коэффициент удлинения — 2.5. Пустоты зачастую имеют ориентированное расположение, также отмечаются участки с разным количеством пустот. Можно выделить два вида пор: относительно крупные вытянутые и почти изометричные мелкие.

В пузыристо-пористых лавах средний размер пустот составляет 661 мкм, средний коэффициент удлинения — 2.4. В этом типе лав поры расположены более сложным образом. Так, в некоторых образцах чередуются полосы с крупными и мелкими пустотами, вытянутыми и

Статистические данные о пористости, средних размерах и форме пустот в лавах ТФИ-50 разного типа
Statistical data on porosity, average sizes and shape of vesicles in different types of TFE-50 lavas

Тип лав Lava type	Частота Frequency, %	Пористость Porosity, %			Размер пор, мкм Pore size, mcm			Коэффициент удлинения Elongation coefficient		
		$\bar{X}$	S_x	V_x	$\bar{X}$	S_x	V_x	$\bar{X}$	S_x	V_x
Плотные Dense	4.4	3.6	1.3	37.7	184	211	114.7	2.2	0.9	40.9
Пористые Porous	13.3	8.5	1.3	15.3	481	614	127.7	2.5	1.2	48.0
Пузыристо-пористые Vesicular-porous	53.4	18.3	5.6	30.3	661	830	125.6	2.4	2.5	104.2
Пористо-пузыристые Porous-vesicular	15.6	39.4	7.8	19.8	1034	603	58.3	3.4	2.9	85.3
Пузыристые (шлаки) Scoria	13.3	62.3	5.9	9.5	1104	946	85.7	1.9	0.8	42.1

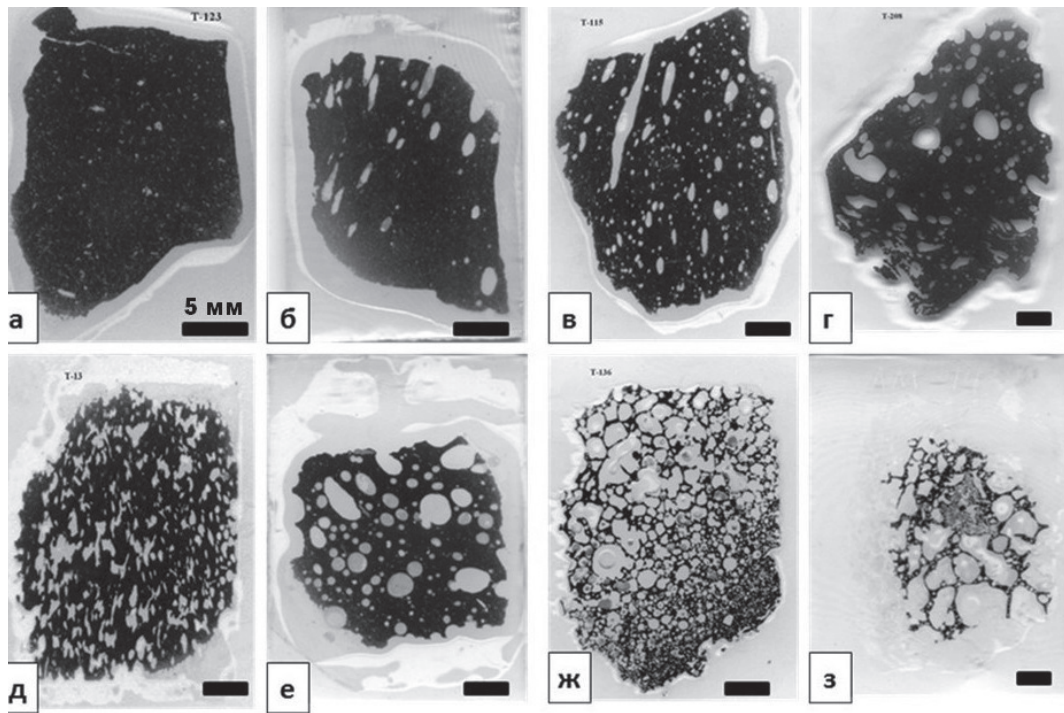


Рис. 3. Фотографии шлифов разных типов лав ТТИ-50: а — плотные; б — пористые; в, г — пузыристо-пористые; д, е — пористо-пузыристые; ж, з — пузыристые (шлаки)

Fig. 3. Photos of the sections of TFE-50 different lava types: а — massive; б — porous; в, г — vesicular-porous type; д, е — porous-vesicular type; ж, з — scoria

изометричными, ориентированными и хаотически расположенными. Есть области с явно выраженной флюидальностью, когда сильно удлинённые пустоты обнаруживают соориентацию удлинениями и образуют волнообразные или даже спиралевидные скопления. Этот тип лав характеризуется наибольшей вариацией коэффициента удлинения ($V_x = 104.2\%$).

В *пористо-пузыристых* лавах средний размер пустот составляет 1034 мкм, средний коэффициент удлинения достигает 3.4. Полости в образцах этого типа весьма неоднородны по форме, подразделяются на почти изометричные, равномерно распределенные и удлинённые, морфологически более сложные из-за коалесценции, субсогласно ориентированные и распределенные неравномерно.

В *пузыристых* лавах средний размер пустот составляет 1104 мкм, большинство из них по форме почти изометричные, средний коэффициент удлинения — 1.9.

Обсуждение результатов

Распределение изученных образцов по типам лав (рис. 4) в нашей выборке очень похоже на гауссовское. Это говорит о том, что пузыристость рассматриваемых вулканитов обусловлена множеством случайных и равносильных факторов [3, 7]. Иначе говоря, влияние таких факторов, как вязкость, плотность, температура, газонасыщенность, скорость движения лавы и др. на образование пустот было соизмеримым.

Полученные статистические данные показывают, что в ряду от плотных лав к пористо-пузыристым увеличиваются средние размеры пустот и их коэффициенты удлинения (рис. 5). То есть в указанном направлении происходит более или менее сопряженный рост пористости, средних размеров и коэффициентов удлинения пустот. Следует подчеркнуть, что с увеличением доли вытянутых пустот в лавах появляется и усиливается директивность — субсогласная ориентация пор удлинениями.

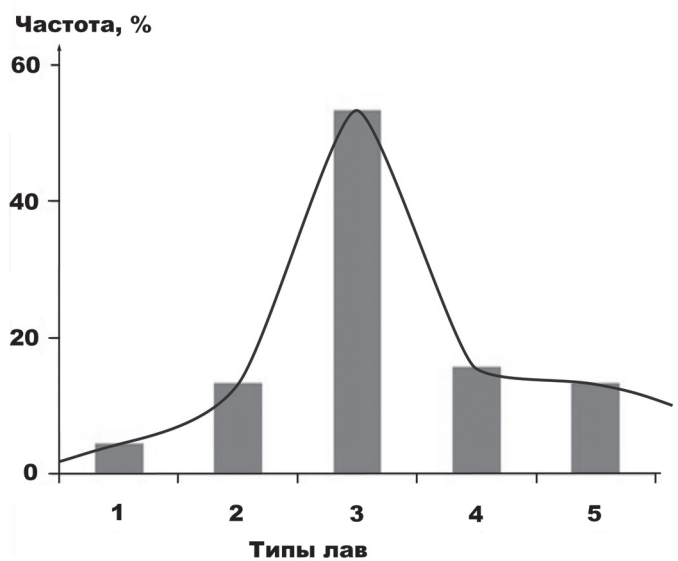


Рис. 4. Распределение исследованных образцов по типам лав: 1 — плотные, 2 — пористые, 3 — пузыристо-пористые; 4 — пористо-пузыристые, 5 — пузыристые

Fig. 4. Distribution of the samples according to the lava types: 1 — massive type, 2 — porous type, 3 — vesicular-porous type, 4 — porous-vesicular type, 5 — scoria

При переходе от пористо-пузыристых лав к пузыристым наблюдается относительно малый прирост среднего размера пустот, но разброс их размеров увеличивается. Помимо этого, в шлаковидных вулканитах скачкообразно уменьшается коэффициент удлинения. Отличия пустот шлаков от других типов лав, скорее всего, связаны с влиянием аэродинамического фактора.

Заключение

В результате проведенных исследований было установлено, что в вулканитах ТТИ-50 пузыристость колеблется в очень широких пределах (2.5–83 %), а пустоты

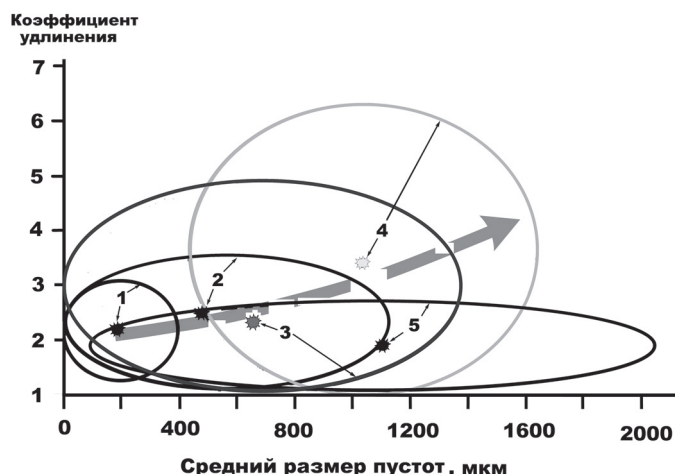


Рис. 5. Корреляция размеров и степени удлинения пустот в лавах ТТИ-50: 1–5 — типы лав (см. рис. 4); точки — средние арифметические; эллипсы — средние арифметические $\pm$ стандартные отклонения. Стрелкой показан тренд изменения размеров и формы пустот в ряду от плотных лав к пористо-пузыристым

Fig. 5. Correlation between average sizes and elongation of vesicles in TFE-50 lavas: 1–5 — types of lava; points show arithmetic means; ellipses show areas of standard deviations. The arrow shows a trend of change in size and shape of vesicles in the series from the massive lavas to the porous-vesicular type

сильно варьируют по размеру (15–7474 мкм) и степени удлинения (1–28). Все это свидетельствует о значительной неоднородности условий формирования лавовых потоков, что может быть формализовано путем подразделения лав на пять типов, из которых преобладающим является пузыристо-пористый. В ряду от плотных к пористо-пузыристым лавам наблюдается сопряженное увеличение совокупного объема полостей, среднего их размера и коэффициента. В шлаковидных лавах эта тенденция нарушается, что может быть связано с влиянием аэродинамического фактора.

Статистические расчеты показали, что распределение образцов по типам лав в нашей выборке очень похоже на нормальное гауссовское. Это позволяет говорить о соизмеримом влиянии на пузыристость лав всего множества факторов — плотности, газонасыщенности, вязкости, динамики и др.

Авторы благодарят д. г.-м. н. Г. А. Карпова за руководство полевыми исследованиями, д. г.-м. н. С. А. Хубуная за переданные для исследований образцы из уникальной музейной коллекции.

Литература

1. Двигало В. Н., Свирид И. Ю., Шевченко А. В. Аэрофотограмметрические исследования нового трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг.: Материалы ежегодной конференции, посвящённой дню вулканолога, 27–28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 58–62.
2. Карпов Г. А., Силаев В. И., Аникин Л. П., Ракин В. И., Васильев Е. А., Филатов С. К., Петровский В. А., Флёров Г. Б. Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 3–20.

3. Никифоров И. А. Статистический анализ геологических данных: Учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2010. 170 с.
4. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. 270 с.
5. Соколов В. Н. Количественный анализ микроструктуры горных пород по их изображениям в растровом электронном микроскопе // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 8. С. 72–78.
6. Хубуная С. А., Ерёмкина Т. С., Соболев А. В. Формационная принадлежность калиевых трахиандезит-базальтов побочного извержения 2012–2013 гг. вулкана Плоский Толбачик по геохимическим признакам (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 1. С. 1–19.
7. Чини Р. Ф. Статистические методы в геологии. М.: Мир, 1986. 189 с.
8. Plechov P., Blundy J., Nekrylov N., Melekyova E., Shcherbakov V., Tikhonova M. S. Petrologia and volatile content of magmas erupted from Tolbachik Volcano, Kamchatka, 2012–2013 // J. Volcanology and Geothermal Research, 2015. V. 307. P. 182–199.

References

1. Dvigalo V. N., Svirid I. Yu., Shevchenko A. V. *Aerofotogrammetricheskie issledovaniya Novogo treschin-nogo Tolbachinskogo izverzheniya 2012–2013 gg* (Aerophotogrammetrical researches of new fissure Tolbachik eruption in 2012–2013). Proceedings of conference, March, 27–28 2014. Petropavlovsk-Kamchatskii: IViS DVO RAN, 2014, pp. 58–62.
2. Karpov G. A., Silaev V. I., Anikin L. P., Rakin V. I., Vasilev E. A., Filatov S. K., Petrovskii V. A., Flerov G. B. *Almazy i soputstvuyushchie mineraly v produktakh Treschin-nogo Tolbachinskogo izverzheniya 2012–2013 gg* (Diamonds and accompanying minerals in products of Fissure Tolbachik eruption). *Vulkanologiya i seismologiya*, 2014, No. 6, pp. 3–20.
3. Nikiforov I. A. *Statisticheskii analiz geologicheskikh dannykh* (Statistical analysis of geological data). Orenburg: OGU, 2010, 170 pp.
4. Saltykov S. A. *Stereometricheskaya metallografiya* (Stereometrical metallography). Moscow: Metallurgiya, 1976, 270 pp.
5. Sokolov V. N. *Kolichestvennyi analiz mikrostruktury gornyh porod po ih izobrazheniyam v rastrovom elektronnom mikroskope* (Quantitative analysis of rocks microstructure by their images in electronic microscope). *Sorosovskii obrazovatelnyi zhurnal*, 1997, No. 8, pp. 72–78.
6. Hubunaya S. A., Eremina T. S., Sobolev A. V. *Formatsionnaya prikladnost kalievyykh trahiandezibazaltov poboch-nogo izverzheniya 2012–2013 gg. vulkana Ploskii Tolbachik po geohimicheskim priznakam (Kamchatka)* (Formational affinity of potassium trachyandesibasalts of adventives eruption in 2012–2013 of Plosky Tolbachik volcano by geochemical features (Kamchatka)). *Vulkanologiya i seismologiya*, 2016, No. 1, pp. 1–19.
7. Chini R. F. *Statisticheskie metody v geologii* (Statistical methods in geology). Moscow: Mir, 1986, 189 pp.
8. Plechov P., Blundy J., Nekrylov N., Melekyova E., Shcherbakov V., Tikhonova M. S. Petrologia and volatile content of magmas erupted from Tolbachik Volcano, Kamchatka, 2012–2013 J. Volcanology and Geothermal Research, 2015, V. 307, pp. 182–199.



ДИАГНОСТИКА ПРИРОДНЫХ ТЕЛЛУРИДОВ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ (РУДОПРОЯВЛЕНИЕ «САВАБЕЙСКИЙ», ПАЙ-ХОЙ)

Р. И. Шайбеков¹, С. И. Исаенко¹, А. В. Журавлев¹, А. Вымазалова²

¹Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

shaybekov@geo.komisc.ru

²Геологическая служба Чехии, Прага

anna.vymazalova@geology.cz

Сульфидная медно-никелевая минерализация широко распространена в габбро-дolerитовых телах Пай-Хоя (Югорский полуостров) и характеризуется многочисленным присутствием благородных металлов. В результате проведенных исследований с использованием рентгеновской микротомографии и рамановской спектроскопии получены новые данные по природным теллуридам благородных металлов на рудопроявлении «Савабейский». Показана эффективность использования микротомографии для определения теллуридов палладия и дальнейшей качественной подготовки образцов для микрозондовых исследований. Впервые для сульфидных медно-никелевых руд Пай-Хоя получены качественные КР-спектры теллуридов благородных металлов (палладия и серебра).

Ключевые слова: Пай-Хой, рудопроявление «Савабейский», теллуриды благородных металлов, рамановская спектроскопия, рентгеновская микротомография.

DIAGNOSTICS OF NATURAL TELLURIDES OF NOBLE METALS USING RAMAN SPECTROSCOPY AND X-RAY MICROTOMOGRAPHY (ORE OCCURRENCE SAVABEYSKY, PAY-KHOY)

R. I. Shaybekov¹, S. I. Isayenko¹, A.V. Zhuravlev¹, A. Vymazalova²

¹Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktyvkar

²Czech Geological Survey, Prague

Copper-nickel sulphide mineralization is widespread in gabbro-dolerite bodies of Pay-Khoy (Ugra Peninsula) and characterized by a large presence of noble metals. The studies using X-ray microtomography and Raman spectroscopy obtained new data on noble metals tellurides from the Savabeysky mineralization. Microtomography is useful to determine palladium tellurides and further microprobe investigation. The Raman spectra of noble metals (palladium and silver tellurides) tellurides were obtained for the first time for the copper-nickel sulfide from Pay-Khoy ores.

Keywords: Pay-Khoy, Savabeysky mineralization, tellurides of noble metals, Raman spectroscopy, X-ray microtomography.

Введение

Большинство природных минералов благородных металлов ввиду их небольших размеров и редкого распространения довольно сложно диагностировать. Наиболее подходящим и широко используемым способом их идентификации является метод высокоразрешающей микроскопии, который позволяет получать качественные EDS-, WDS-характеристики минералов, несмотря на их небольшие размеры. Главным минусом такого метода является то, что если минерал имеет размеры меньше диаметра пучка зонда, то получить корректный химический состав довольно сложно, ввиду того что захватывается окружающая минерал область. Несмотря на то, что в настоящее время существуют сканирующие электронные микроскопы с возможностью диагностики наноразмерных минеральных фаз, до сих пор главной проблемой при изучении химического состава минералов остается определение их структурной разновидности, а также необходимость подтверждения полиморфной модификации, например с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА). При этом для метода РСА необходим объем анализируемого материала, равный 100 мм³, что не подходит в случаях, когда отбор нужного количества вещества невозможен. В случае использования фотометода требуется незначительный объем материала (1 мм³ и мень-

ше) или монокристаллы размером от 100 мкм, но главным его недостатком остается невысокая разрешающая способность.

Одними из новых методов диагностики микроразмерных минералов платиновых металлов являются рентгеновская микротомография и рамановская спектроскопия. И тот и другой методы являются лишь частью комплексного подхода к изучению минералов. Рентгеновская томография, несмотря на щадящий метод пробоподготовки, при изучении микроразмерных минеральных фаз благородных металлов имеет ряд ограничений — зависимость от параметров плотности (сложность при диагностике близких по плотностям минералов) и размеров исследуемых объектов. Метод рамановской спектроскопии, как и метод рентгеновской микротомографии, не требователен к подготовке образца, но при этом позволяет получить КР-спектры минеральных фаз размером от 1 мкм.

В настоящее время существует не много работ, в которых для диагностики минералов благородных металлов использовались методы рентгеновской микротомографии и рамановской спектроскопии. В первом случае они преимущественно касаются исследований золота, во втором преобладающая часть исследований затрагивает искусственно синтезированные минералы платиновой

группы [6, 10 и другие]. В связи с этим диагностика природных минералов благородных металлов с использованием вышеописанных методов является актуальной.

В данной статье приводятся результаты диагностики природных теллуридов благородных металлов в сульфидных медно-никелевых рудах хенгурского габбро-долеритового комплекса с использованием метода рентгеновской микротомографии и — впервые — рамановской спектроскопии.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовались пробы меланократового среднекристаллического кварцосодержащего габбро-долерита с сульфидной медно-никелевой минерализацией рудопоявления «Савабейский», находящегося в центральной части хенгурского габбро-долеритового комплекса Пай-Хоя. Рудопоявление приурочено к северо-восточному флангу сложнослоистого интрузивного тела позднедевонского возраста, располагающегося среди пород ордовика. В строении интрузива принимают участие габбро-долериты от микро- до крупнокристаллических и их кварц-, оливинсодержащие разновидности с редкими линзами долерит-пегматитов [4]. В рамках рудопоявления по структурно-морфологическим и минералогическим особенностям выделяются два типа руд:

1 тип — шлирово-вкрапленный пентландит-халькопирит-пирротин (до 20 %), локализованный в среднекристаллических меланократовых габбро-долеритах с максимальными установленными содержаниями $Pt + Pd + Au$, равными 0.94 г/т.

2 тип — гнездово-вкрапленный, прожилково-вкрапленный пирит-халькопирит-пирротин (до 10 %), приуроченный к горизонту кварцевых крупнокристаллических долеритов и долерит-пегматитов [4].

Микрорентгеномографические исследования проводились на приборе Skyscan 1173 на базе НМСУ «Горный» (Санкт-Петербург). В качестве объекта выступили руды 1-го типа, из которых был выпилен образец размером 1×1.5 см. Съемка проводилась при ускоряющем напряжении 130 кВ (ток 61 мкА) с угловым шагом 0.16° и пространственным разрешением 17.05 мкм. При съемке использовался латунный фильтр толщиной 0.25 мм, что обеспечивало эффективную энергию излучения в диапазоне 40–90 кэВ. Реконструкция томограмм осуществлялась программным обеспечением NRecon (BrukerCT) с последующей обработкой программами CTA (BrukerCT), VolView (Kitware Inc.) и ImageAnalyser. Сегментация изображений и идентификация минеральных фаз проводилась в ручном режиме с учетом данных о соотношении рентгеновских плотностей минералов (NIST XCOM database [9]).

Регистрация спектров комбинационного рассеяния света (КР) проводилась на спектрометре LabRam HR 800 (Horiba Jobin Yvon) в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). В качестве образцов использовались аншлифы из руд 1-го и 2-го типов. Условия регистрации спектров: решетка монохроматора — 600 ш/мм, конфокальное отверстие — 300 мкм, щель — 100 мкм, время экспозиции — 1–10 сек, количество циклов накопления сигнала — 10, мощность возбуждающего излучения Ar^{+} -лазера (514.5 нм) — 12 мВт. После регистрации спектров комбинационного рассеяния света изученных образцов с помощью свертки функций Гаусса — Лоренца стандартной программы обработки спектров LabSpec (5.36) были определены положения максимумов линий спектров.

Результаты и их обсуждение

Минералого-геохимическая характеристика сульфидной медно-никелевой и благороднометалльной минерализации на рудопоявлении «Савабейский» довольно подробно отражена авторами в недавно опубликованной научной работе [2]. В результате исследований (в которых частично приводятся данные по рентгеновской микротомографии) были установлены и подробно описаны минералы благородных металлов, среди которых выделяются гессит, сперрилит, серебросвинцовистые висмутотеллуриды, теллуриды палладия и золота. Наибольшее распространение из них имеют теллуриды палладия, которые характеризуются изменчивостью состава и относятся к промежуточным минералам изоморфного ряда соболевскит — садбериит ($PdBi - PdTe - PdSb$), а также теллуриды серебра (гессит). Установлено, что наиболее высокотемпературными из них являются котульскит, сурьмяно-висмутовые и висмuto-сурьмянистые теллуриды палладия, самыми низкотемпературными — сперрилит, гессит, висмутотеллуриды и золото.

В последнее время метод компьютерной рентгеновской микротомографии стал широко применяться в различных областях геологии — от изучения структур магматических пород до поиска и исследования микропалеонтологических объектов [1, 3, 7]. Постоянная модернизация оборудования и улучшение его пользовательских характеристик способствуют расширению круга решаемых задач. Одно из преимуществ рентгеномографического метода состоит в возможности многократного и разнопланового исследования одного и того же образца без его разрушения, что особенно актуально при работе с уникальным или ограниченным по объему материалом. Использование рентгеновского микротомографа для определения рудных минералов, в отличие от нанотомографа, является предпочтительным, так как на современном уровне исследований в этой области первый обладает более высокой разрешающей способностью по рентгеновской плотности.

Ввиду того, что наиболее крупными из установленных минералов благородных металлов являются теллуриды палладия [2], была предпринята попытка их идентификации с помощью рентгеновского микротомографа, так как размеры минералов превышают минимальную область определения, ограниченную для используемого прибора 17 мкм (см. «Объекты и методы исследования»). Следует отметить, что более новые рентгеновские томографы позволяют определять минеральные фазы размером в первые микроны (например, для модели Skyscan 1272 это значение составляет 3–4 мкм).

В результате рентгеномикротомографических исследований установлено, что в рамках исследуемого образца (1×1.5 см) на шлирово-вкрапленную пентландит-халькопирит-пирротиную минерализацию приходится чуть менее 0.5 %, при этом она хорошо разделена по рентгеновским плотностям. В частности, пирротин представляет большую часть — 0.33 %, халькопирит — 0.126 %, теллуриды палладия — 0.004 % (рис. 1).

Так как рентгеновская плотность пентландита немногим выше, чем у пирротина (соотношение 1.04 : 1), то разделить их в рамках образца с помощью рентгеновской микротомографии с учетом существующего разрешения не представилось возможным. Сложность выделения пентландита данным методом больше ограничивается минералогическими особенностями, так как пентландит существует в ассоциации с пирротинном в виде сростков,

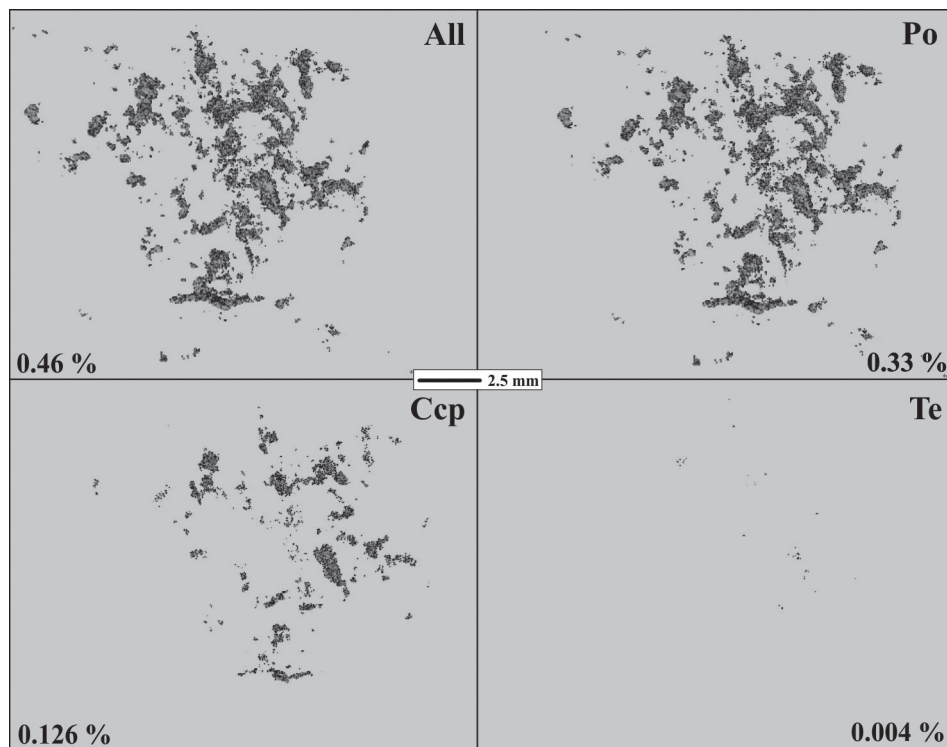


Рис. 1. Распределение рудных минералов в образце со шлирово-вкрапленной минерализацией по рентгеновским плотностям: All — все рудные минералы, Po — пирротин, Csp — халькопирит, Te — теллурид палладия

Fig. 1. Distribution of ore minerals in the sample with a schlieren-disseminated mineralization by x-ray densities: All — all ore minerals, Po — chalcopyrite, Csp — pyrrhotite, Te — telluride palladium

линз и пламевидных выделений. Единственным фактором, который мог бы способствовать увеличению рентгеновской плотности пентландита, является примесь кобальта, но ввиду незначительных содержаний никакого влияния она не оказывает.

Похожая ситуация частично прослеживается между пирротин и халькопиритом ввиду небольшой разницы в рентгеновских плотностях (1 : 1.1), характера взаимоотношений и изменчивости состава последнего и приводит к тому, что их области перекрываются, но при этом минерал хорошо диагностируется. Вариации рентгеновских плотностей рудной минерализации с учетом областей покрытия их составов приведены на рис. 2.

Как уже отмечалось выше, по минералогическим и микрозондовым данным халькопирит преимущественно

находится в сростках с пирротин или образует по нему каймы, что наглядно подтверждается и прослеживается на томографических изображениях (рис. 1). Теллуриды же палладия присутствуют в основном в ассоциации с халькопиритом, при этом рентгеномикротомографические исследования показывают более крупные его выделения с содержанием более 1 % в рудной массе. Такое различие связано преимущественно со способом пробоподготовки, так как при изготовлении аншлифа получить срез с максимальными содержаниями платиноидов довольно трудно.

Качественная диагностика благородных металлов ввиду их небольших размеров является важной для решения минералогических задач. Использование нескольких методов позволяет более детально говорить об их составе, морфологии и взаимосвязи с другими минералами. Первичное исследование рентгеномикротомографическим методом позволяет определить содержание, морфологию и распределение теллуридов палладия в рамках образца, но не дает представления о его химическом составе. Микрозондовые EDS/WDS-исследования теллуридов благородных металлов отражают их состав, но получить качественные характеристики выделений, имеющих небольшой размер (меньше диаметра пучка), из-за захвата при анализе окружающей их матрицы не представляется возможным, что вносит свои коррективы. Метод рамановской спектроскопии является дополняющим и позволяет идентифицировать минералы размером от 1 мкм, что увеличивает точность микрозондовых исследований.

Палладийсодержащие минералы довольно подробно описаны в последней работе Шайбекова, Журавлева [2] и представлены минеральными фазами изоморфного ряда *соболевскит – садберит* ($PdBi - PdTe - PdSb$): *висмутосурьмянистым* и *сурьмяно-висмутосурьмянистым теллуридами палладия*, а также *котульскитом*. Как правило, большая их часть ассоциирует с халькопиритом, в небольших количествах отмечается их локализация в пирротине, а также среди породообразующих минералов. Размеры варьируют от первых до не-

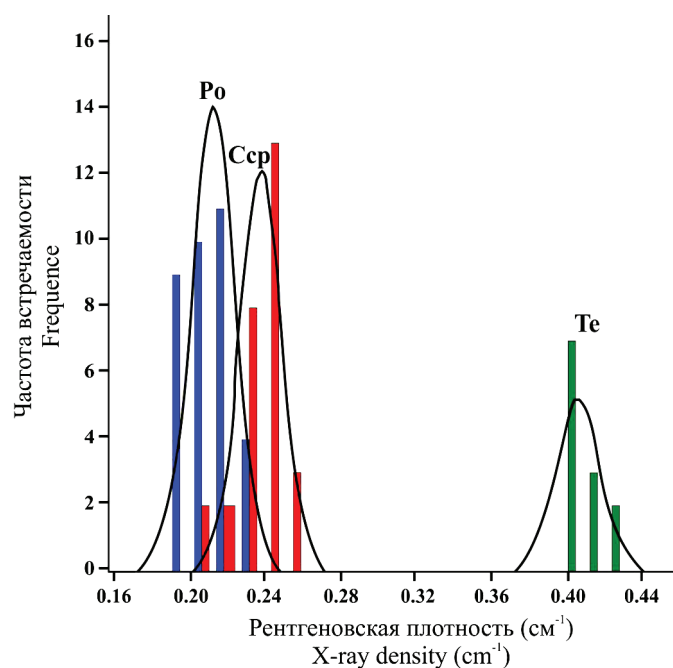


Рис. 2. Распределение рентгеновской плотности минеральных фаз
Fig. 2. The distribution of the X-ray density of the mineral phases

скольких десятков микрон, а химический состав характеризуется широкими вариациями висмута и сурьмы.

Проведенные методом рамановской спектроскопии исследования позволили получить спектры теллуридов палладия, локализующихся в пирротине и халькопирите образца 36/1 (рис. 3, 4). Теллурид палладия в каверне пирротина представлен включением размером 5×5 мкм со следующим химическим составом: Pd — 25.62, Te — 32.29, Bi — 36.14, Sb — 4.94 (сумма 99.00 мас. %), характеризующимся КР-спектром с полосами 99 и 127 см^{-1} (рис. 3, с; 4). Кристаллохимическая формула включения соответствует виду $Pd_{2.04}(Te_{2.16}Bi_{1.47}Sb_{0.33})_{3.96}$. Кроме того, в халькопирите удалось идентифицировать диагностированный ранее с помощью EDS сурмяно-висмутый теллурид палладия, представляющий собой включение размером 5×10 мкм (рис. 3, а, b) со следующим химическим составом: Pd — 28.98, Te — 43.96, Bi — 19.44, Sb — 8.47 (сумма 100.84 мас. %). Кристаллохимическая формула соответствует виду $Pd_{2.10}(Te_{2.64}Bi_{0.72}Sb_{0.54})_{3.90}$. В результате был получен КР-спектр с полосами 95 и 124 см^{-1} (рис. 4).

В базе данных RRUFF (<http://rruff.info>) из основных минералов изоморфного ряда соболевскит — садбериит ($PdBi - PdTe - PdSb$) представлен только фрудит ($PdBi_2$), КР-спектр которого нельзя использовать ввиду отсутствия отчетливых полос в раман-спектре. В настоящее время наиболее полной и обобщающей работой по рамановской спектроскопии минералов платиновой группы является статья R. J. Bakker и др. [6], которая основана на использовании спектров базы RRUFF, собственных данных авторов и анализа ряда публикаций по природным и искусственно синтезированным МПГ. Проведенный R. J. Bakker и др. анализ другого минерала ряда $PdBi - PdTe - PdSb$ — соболевскита — не показал различимых полос в спектре КР [6]. Как видно на рис. 4, идентифицированные теллуриды палладия отличаются от спектров известных на данный момент минералов платино-

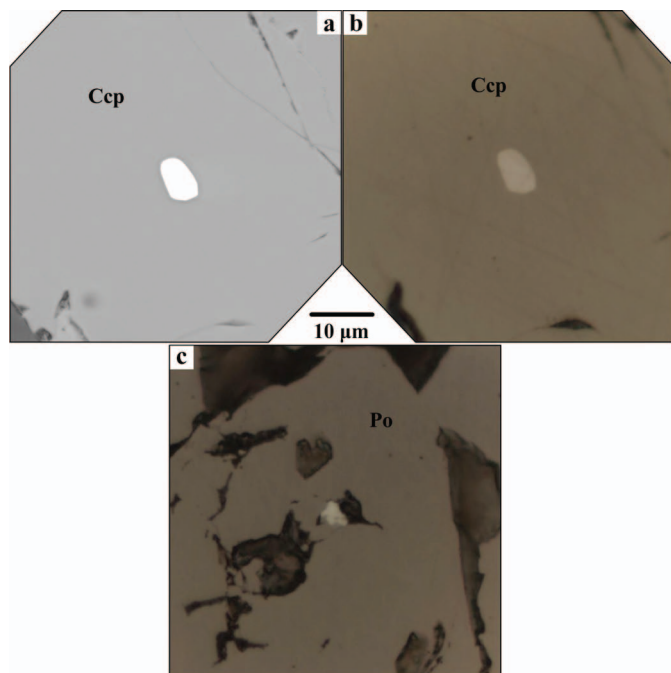


Рис. 3. Теллурид палладия в халькопирите (а, b) и пирротине (с): а — BSE-изображение (SEM Tescan Vega 3 LMH); b, c — оптическое изображение в отраженном свете (микроскоп Olympus BX-41)

Fig. 3. Telluride palladium in chalcopyrite (a, b) and pyrrhotite (c): а — BSE image (SEM Tescan Vega 3 LMH); b, c — an optical image by reflected light (microscope Olympus BX-41)

вой группы. Некоторые схожие черты можно наблюдать в КР-спектрах синтетического котульскита (максимум при 97 см^{-1}) и природного инсизвайта (полосы 96 и 126 см^{-1}), «седло» в КР-спектре диагностированного минерала соответствует полосам природных МПГ — мончеита (115 см^{-1}) и инсизвайта (114 см^{-1}).

Также в образце 32/2 этим же методом был диагностирован гессит, находящийся в ассоциации с пирротинном, пентландитом и кубанитом, полное описание и состав которого приведен в работе Шайбекова, Журавлева [2]. В результате проведенного исследования для гессита получен спектр с двумя уширенными линиями 86 и 138 см^{-1} (рис. 5, 6). На данный момент нам известно лишь о единичных исследованиях гессита методом рамановской спектроскопии — так, в работе Milenov et al [8] приведены неполяризованные и поляризованные спектры синтетического поликристаллического гессита. Согласно этим данным, неполяризованный спектр име-

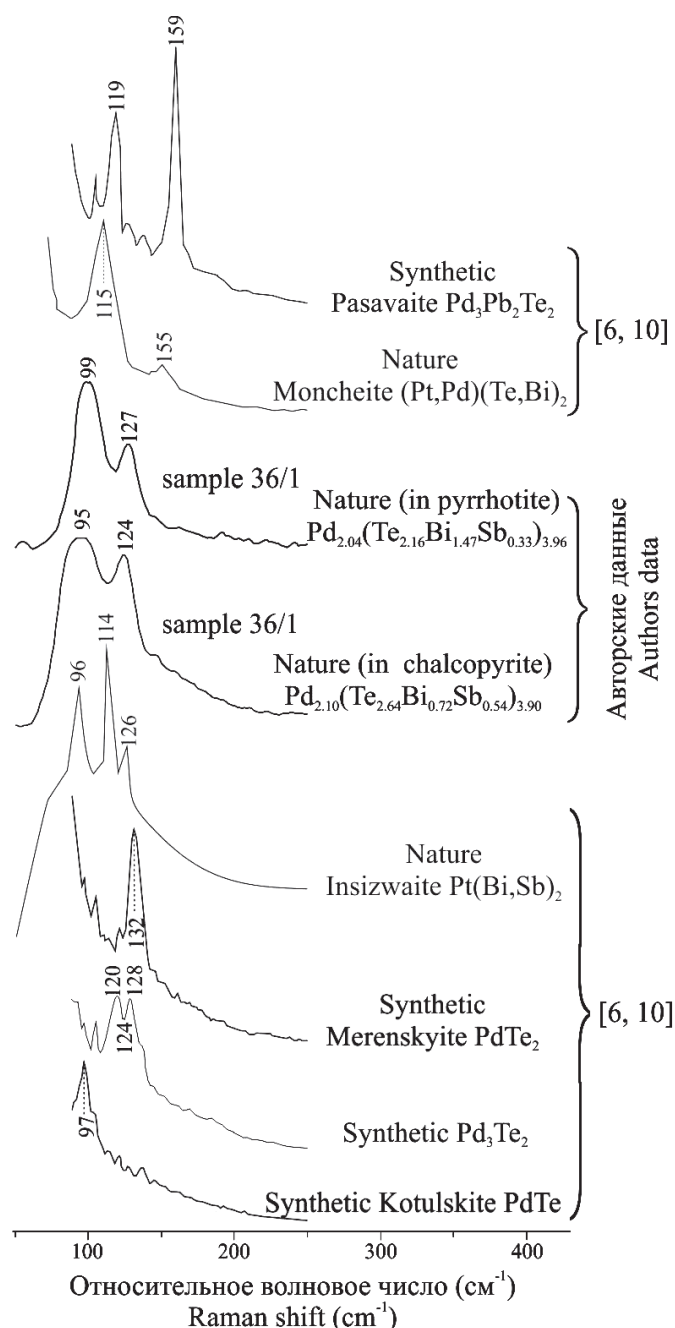


Рис. 4. Рамановские спектры теллуридов платины и палладия
Fig. 4. Raman spectra of telluride platinum and palladium

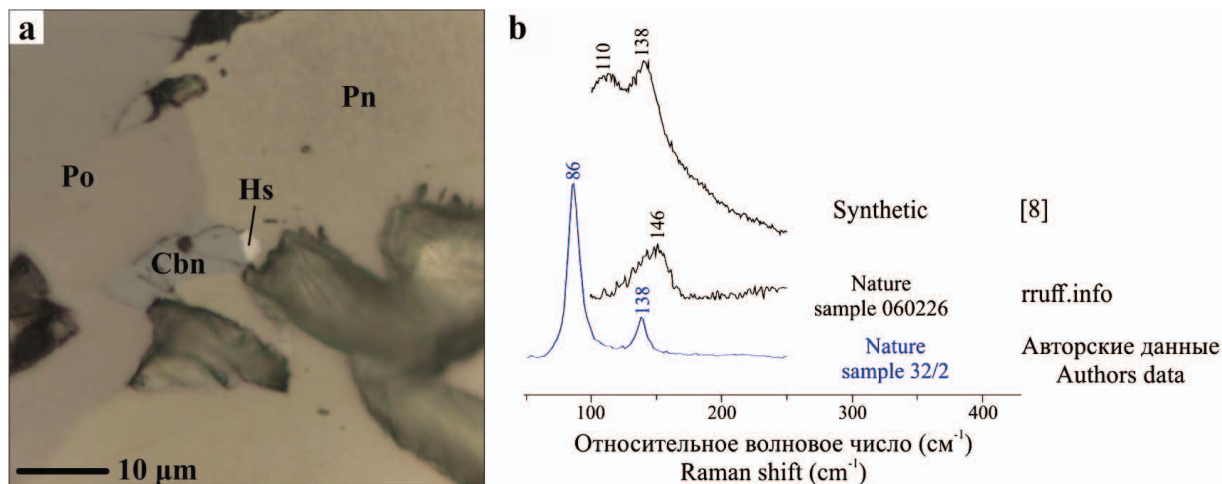


Рис. 5. Рамановская спектроскопия гессита в сульфидных рудах: а — оптическое изображение в отраженном свете (микроскоп Olympus BX-41), б — рамановские спектры теллуридов серебра

Fig. 5. Raman spectroscopy of hessite in sulfide ores: a — an optical image by reflected light (microscope Olympus BX-41), b — Raman spectra of silver tellurides

ет три максимума — 80, 110 и 138 cm^{-1} , в поляризованном спектре фиксируются четыре максимума — 101, 108, 131 и 140 cm^{-1} (при использовании поляризационного фильтра полосы со сдвигом менее 90 cm^{-1} обрезаются). Исходя из полученных данных, автор делает вывод о том, что гесситу соответствуют две полосы — 111 и 134 cm^{-1} — и уширенная область с максимумом при 80 cm^{-1} . В работе Aporei et al [5] приводятся данные по рамановской спектроскопии гессита, в том числе с использованием результатов Milenov et al [8] и Downs со ссылкой на базу RRUFF. Согласно отраженным в статье данным, гессит имеет два интенсивных пика с максимумами 119 и 138 cm^{-1} (по Downs) и 110 и 138 cm^{-1} (по [8], неполяризованный спектр). В базе RRUFF в КР-спектре гессита наблюдается широкая полоса — 146 cm^{-1} , которая, по материалам, отраженным в статье Aporei et al [5], больше соответствует шпюциту. Несмотря на то, что данные в указанных работах несколько разнятся, в обоих случаях для гессита отмечается характерная полоса 138 cm^{-1} , которая наблюдается и в наших КР-спектрах.

Заключение

Рентгеномикротомографические исследования шлирово-вкрапленной пентландит-халькопирит-пирротиновой минерализации показали возможность диагностики этим методом близких по рентгеновским плотностям сульфидных минералов и теллуридов благородных металлов без специальной пробоподготовки. Кроме того, были установлены более значимые концентрации теллуридов палладия и их плотностные характеристики, позволяющие уверенно выделять их в массе как порообразующих, так и сульфидных минералов, в частности для рудопроявлений габбродолеритовых комплексов Пай-Хоя. Данный метод увеличивает эффективность подготовки шлифов для EDS-, WDS-исследований благородных металлов, позволяя делать срезы с их максимальными концентрациями.

Метод рамановской спектроскопии, впервые использованный авторами настоящей статьи для диагностики сульфидной медно-никелевой минерализации, позволил получить качественные КР-спектры теллуридов благородных металлов на рудопроявлении «Савабейский», дополнив тем самым современную базу КР-спектров минералов платиновой группы.

Авторы выражают благодарность А. А. Штырлевой (НМСУ «Горный», г. Санкт-Петербург) за проведение рентгеномикротомографической съемки.

Работа выполнена при поддержке гранта фундаментальных научных исследований УрО РАН №15-15-5-73 «Георесурсы арктических территорий Тимано-Уральского региона и перспективы их освоения».

Литература

1. Журавлев А. В., Вевель Я. А. Возможности использования вычислительной микротомографии в микропалеонтологических и литологических исследованиях // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. № 2. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2/21_2012.pdf.
2. Шайбеков Р. И., Журавлев А. В. МПГ-минерализация в сульфидных рудах проявления «Савабейский» (Центральный Пай-Хой, Югорский полуостров) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2016. № 9–10 (261). С. 45–51. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-10-45-51.
3. Штырлева А. А., Журавлев А. В., Герасимова А. И. Перспективы и проблемы использования компьютерной микротомографии для изучения образцов керна // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11. № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/12/8_2016.pdf.
4. Юшкин Н. П., Куниц А. Ф., Тимонин Н. Н. Минерация Пай-Хоя. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 291 с.
5. Aporei A. I., Damian G., Buzgar N., Milovska S., Buzatu A. New occurrences of hessite, petzite and stützite at Coranda-Hondol open pit (Certej gold-silver deposit, Romania). Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 9, 2, 2014. Pp. 71–78.
6. Bakker R. J. Application of combined micro-Raman and electron probe microanalysis to identify platinum group minerals / In: 11-th EMAS regional workshop on electron probe microanalysis of materials today, Practical Aspects, 2014. P. 215–233.
7. Ketcham R. A., Carlson W. D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences // Computers & Geosciences. 2001. 27. P. 381–400.
8. Milenov T. I., Tenev T., Miloushev I., Avdeev G. V., Luo C. W., & Chou W. C. Preliminary studies of the Raman spectra of Ag_2Te Ag_5Te_3 . Optical and Quantum Electronics, 46(4), 2014. Pp. 573–580. DOI:10.1007/s11082-013-9810-1.

9. NIST XCOM database at <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>.

10. Vymazalova A., Zaccarini F., Bakker R. J. Raman spectroscopy characterization of synthetic platinum-group minerals (PGM) in the Pd-Sn-Te and Pd-Pb-Te ternary systems // Eur. J. Mineral, V. 26, 2014. P. 711–716.

References

1. Zhuravlev A. V., Vevel Ya. A. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya vychislitel'noy mikrotomografii v mikropaleontologicheskikh i litologicheskikh issledovaniyakh* (Possibilities of using computing microtomography in micropaleontological and lithological researches). *Neftegazovaya geologiya Teoriya i praktika*, V. 7, No. 2, 2012.

2. Shaybekov R. I., Zhuravlev A. V. *MPG-mineralizatsiya v sulfidnykh rudakh proyavleniya Savaybeyskiy (Tsentralnyy Pay-Khoy, Yugorskiy poluostrov)* (MPG mineralization in sulphide ores of Savaybeysky deposit (Central Pay-Khoy, Ygorsky peninsula)). *Vestnik of Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 2016, No. 9–10 (261), pp. 45–51. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-10-45-51.

3. Shtyrl'yayeva A. A., Zhuravlev A. V., Gerasimova A. I. *Perspektivy i problemy ispol'zovaniya kompyuternoy mikrotomografii dlya izucheniya obraztsov kerna* (Prospectives and problems of application of computing microtomography to study samples). *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2016, V.11, No.1. http://www.ngtp.ru/rub/12/8_2016.pdf.

4. Yushkin N. P., Kunts A. F., Timonin N. N. *Minerageniya Pay-Khoya* (Pay-Khoy minerageny). Ekaterinburg: UB RAS, 2007, 291 pp.

5. Apopei A.I., Damian G., Buzgar N., Milovska S., Buzatu A. New occurrences of hessite, petzite and stützite at Coranda-Hondol open pit (Certej gold-silver deposit, Romania). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9, 2, 2014, pp. 71–78.

6. Bakker R. J. Application of combined micro-Raman and electron probe microanalysis to identify platinum group minerals. In: 11th EMAS regional workshop on electron probe microanalysis of materials today, Practical Aspects, 2014, pp. 215–233.

7. Ketcham R. A., Carlson W. D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, 2001, 27, pp. 381–400.

8. Milenov T. I., Tenev T., Miloushev I., Avdeev G. V., Luo C. W., & Chou W. C. Preliminary studies of the Raman spectra of Ag_2Te Ag_5Te_3 . *Optical and Quantum Electronics*, 46(4), 2014, pp. 573–580. DOI:10.1007/s11082-013-9810-1

9. NIST XCOM database at <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>.

10. Vymazalova A., Zaccarini F., Bakker R. J. Raman spectroscopy characterization of synthetic platinum-group minerals (PGM) in the Pd-Sn-Te and Pd-Pb-Te ternary systems. *Eur. J. Mineral*, V. 26, 2014, pp. 711–716.



50 YEARS IN GEOCHEMISTRY

The 80th Jubilee of Ya. E. Yudovich

Ya. E. Yudovich is a prominent geochemistry scientist, a well-known expert in the field of geochemistry of sedimentary rocks, with international recognition. He is the founder of a new scientific direction «Regional geochemistry of sedimentary rocks». Based on his scientific researches Ya. E. Yudovich have published more than 385 scientific papers, including 79 monographs and individual publications.

50 ЛЕТ В ГЕОХИМИИ

К 80-летию Я. Э. Юдовича

Яков Эльевич Юдович — крупный ученый-геохимик, широко известный специалист в области геохимии осадочных пород, пользующийся международным признанием. Основоположник нового научного направления «Региональная геохимия осадочных толщ». По материалам научных исследований Я. Э. Юдович опубликовал более 385 научных работ, в том числе 79 монографий и отдельных изданий.

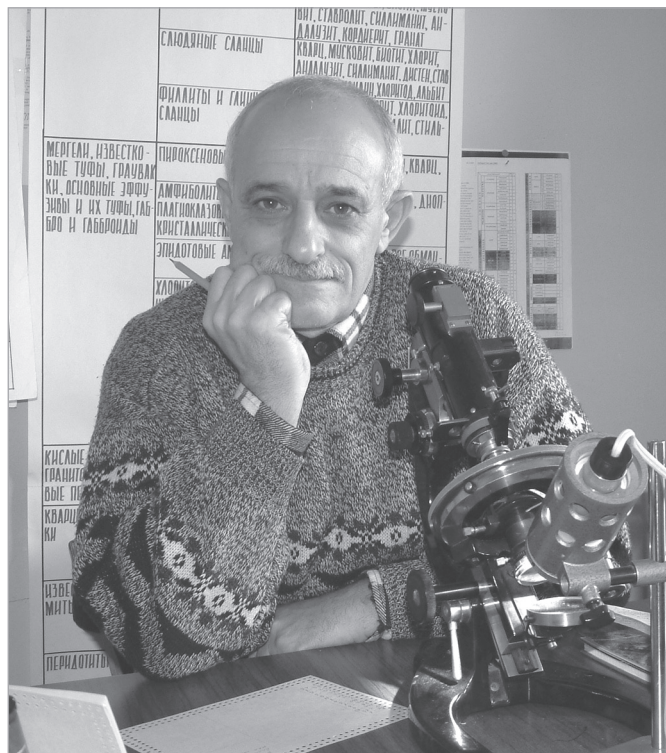
Родился 6 марта 1937 г. в Москве. В 1959 г. окончил с отличием Московский государственный университет по специальности «геохимия». Несколько лет работал в производственных организациях Министерства геологии, успешно защитил кандидатскую диссертацию. С 1967 г. работает в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН, пройдя путь от младшего до главного научного сотрудника.

В 1984 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Региональная геохимия осадочных толщ», став основоположником нового научного направления. Важнейшим результатом этого направления является концепция геохимических горизонтов стратисферы — сравнительно узких интервалов стратиграфического разреза, устойчиво обогащенных определенными рудными компонентами, что позволяет прогнозировать стратиформные месторождения. В осадочных толщах севера Урала и Пай-Хоя на основе этой концепции были определены направления поисков баритов, руд марганца и фосфора.

Я. Э. Юдович — лидер в области геохимии металлоносных черных сланцев. Его фундаментальные монографии в этой области содержат всесторонний анализ генетических проблем и указывают перспективные направления прогноза рудных месторождений в черносланцевых толщах.

Я. Э. Юдович является также одним из основоположников геохимии пороодообразующих компонентов осадочных пород — литохимии. Признанием среди геологов пользуются разработанные им совместно с М. П. Кетрис методы диагностики вулканогенной примеси и продуктов переотложенных кор выветривания в осадочных породах. Широко применяется предложенная ими процедура компьютерной обработки силикатных данных — стандарт ЮК (сокращение от Юдович — Кетрис).

Я. Э. Юдович — один из мировых лидеров в области геохимии ископаемых углей. Его научные труды слу-



жат основой учебников университетских спецкурсов в России и за рубежом. Работы Я. Э. Юдовича внесли значительный вклад в познание геохимии токсичных химических элементов, представляющих опасность для окружающей среды и здоровья людей при промышленном сжигании углей.

Им созданы аналитическая библиография по неорганическому веществу углей, не имеющая мирового аналога, базы данных по минералам-индикаторам (2008) и геохимическим индикаторам (2011) литогенеза, обобщающие огромный массив данных в области генетической минералогии и литологической геохимии.

Среди его учеников — кандидаты и доктора наук. Я. Э. Юдович является членом ученого совета и двух диссертационных советов Института геологии. Он был организатором и руководителем двух всероссийских школ по литохимии (1997, 2006), совещания по геохимии черных сланцев (1987), всероссийских совещаний по минеральным (2011) и геохимическим (2012) индикаторам литогенеза, читал курс лекций по геохимии на кафедре геологии Сыктывкарского госуниверситета, неоднократно выступал с лекциями по геохимии в различных городах России и за границей, пропагандируя достижения российской науки.

Я. Э. Юдович принимает активное участие в общественной жизни. Он избирался народным депутатом Верховного Совета Республики Коми (1991–1995 гг.). За успешную научную и общественную работу награжден почетными грамотами Президиума Верховного Совета Коми АССР и Президиума АН СССР, медалью «Ветеран труда». Ему присвоены звания «Заслуженный работник Республики Коми» (1997), «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (2003 г.) и «Почетный деятель науки Республики Коми» (2012). За цикл работ по геохимии и геохимической экологии ископаемых углей Я. Э. Юдович удостоен премий имени А. П. Виноградова (2011) и Л. Д. Шевякова (2015).

НОЕВ КОВЧЕГ: ЛЕГЕНДЫ И ФАКТЫ

К 10-летию со дня открытия экспозиции А. П. Боровинских

NOAH'S ARK: LEGENDS AND FACTS

The 10th anniversary of the opening of A. P. Borovinskikh's exposition

On March 31 an event dedicated to the tenth anniversary of opening of «Noah's Ark» exposition was held at the Geological museum named A. A. Chernov. The basis of the exposition was a private collection of stone masterpieces from the famous geologist, member of the Scientific Council of the Institute of Geology of Komi SC UB RAS, Doctor of geological and mineralogical Sciences Alexander Pavlovich Borovinskikh.

31 марта состоялось мероприятие, посвященное десятилетию со дня открытия экспозиции «Ноев ковчег» в Геологическом музее им. А. А. Чернова. Основу экспозиции составила частная коллекция изделий из камня известного геолога, члена ученого совета Института геологии Коми НЦ УрО РАН доктора геолого-минералогических наук Александра Павловича Боровинских. В теплой и дружеской обстановке всех собравшихся поздравили с юбилейным событием представители министерств, геологических предприятий, образовательных учреждений, родные и друзья А. П. Боровинских.

Известно, что геологи собирают коллекции руд и минералов, но, как правило, они отдают предпочтение естественному виду камней и лишь для раскрытия рисунка камня делают его срез. Однако Александр Павлович считает, что если камень попадает в руки равнодушного человека с художественным вкусом, то он может открыть новые, «неземные» красоты. Именно красота камня и камнерезное искусство стали критериями отбора в коллекцию геолога, которую он собирает уже на протяжении полувека. Будучи министром природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, А. П. Боровинских привозил со всего света каменные сувениры, а его друзья и коллеги всегда были уверены в выборе подарка. Так собралась изумительная коллекция изделий, в которой можно оценить красоту камнерезного искусства, увидеть традиционные символы (животные, растения, рыбы) различных народов мира. Большое разнообразие воплощенных в камне представителей животного и растительного мира Земли дало название коллекции — «Ноев ковчег».

Подготовительные работы заняли весь 2006 год. В кратчайшие для музейных экспозиций сроки был разработан дизайн-проект, выбраны витрины. Воплотить идею в жизнь помогли группа компаний «Нобель» и «Колва нефть» в лице Г. С. Гуревича и В. Н. Шитова и компания «Северная нефть» в лице С. М. Нестеренко и Ю. В. Лисина.

Вот что рассказал о своей коллекции А. П. Боровинских: «Как и у любого геолога, моя коллекция начиналась с образцов минералов и горных пород, привезенных со студенческих практик, большая часть образцов была с Ильменского заповедника. После приезда в Сыктывкар начал собирать обработанный камень и вот уже более 40 лет пополняю коллекцию каменных изделий. Немалая часть коллекции подарена друзьями, которые знают, чем порадовать меня на праздники. Моими любимыми камнями являются яшма и агат, хотя и к другим камням я отношусь с трепетом. Из каменных фигурок больше всего мне нравятся пингвины и медведи. География экспонатов собранной коллекции охватывает почти все континенты (Африка, Европа, Америка, Австралия), и с каждым экспонатом у меня связаны своя история или теплые воспоминания. В Южной Америке, в одном киоске, помню, меня поразил медведь, вырезанный из бирюзы. Эту красивую вещь, как оказалось, сделали индейцы одного из тамошних племен. Изысканная безделушка стоила достаточно дорого, я несколько раз подходил к торговой точке, пока в конце концов не купил ее. Эти волнения понятны каждому коллекционеру. В коллекции несколько изделий сделаны мастерами Республики Коми,



Поздравления коллекционеру от сотрудников института
Congratulations to the collector from the Institute's employees



Фото на память возле самого крупного экспоната
Commemorative photo near the largest exhibit



в частности Анатолием Семеновичем Сорокиным. Есть серия фигурок животных из горного хрусталя с месторождений Приполярного Урала».

Отвечая на вопрос, будет ли и впредь пополняться коллекция, Александр Павлович показал нам четыре новые каменные фигурки: изящную шкатулку из кальци-



«Коми календарь». Работа А. Калмыкова
«Komi Calendar». A. Kalmykov's piece of art

та, украшенную пчелой из кальцита и селенита, лягушку из органогенного известняка, тукана из серпентинита, кварцита и обсидиана и пингвина из кварцита.

В 2012 году вышла в свет книга «Ноев ковчег» — закономерный этап развития коллекции, позволяющий еще больше расширить географию зрителей, познакомиться с ней многим любителям камня и почитателям прекрасного. Подготовка к публикации этого издания заключалась не только в фотодокументации всей коллекции, но и в определении материала изделия. На сегодня объем коллекции составляет 465 образцов, и ежегодно коллекционер пополняет экспозицию. Фигурки диких животных занимают треть коллекции, намного меньше представлены домашние животные (16 %), птицы (16 %), земноводные и рептилии (17 %). В собрании диких животных 24 фигурки слонов, 21 фигурка медведей, 18 фигурок носорогов и бегемотов. В коллекции домашних животных популярными являются кошки и собаки. Собрана большая коллекция фигурок птиц, чаще всего встречаются попугаи.

Коллекция радует и поражает неожиданной красотой и разнообразием камня. Более 60 различных горных пород и минералов использованы камнерезами. Вдохновение, полет фантазии и мастерство позволяет из монолитного куска горной породы создать пантеру с детенышами (хризопраз), льва (сердолик), пятнистого далматинца (эклогит). Текстура и рисунок камня также помогают мастерам осуществить свой замысел. В собрании чаще встречаются фигурки из яшмы, мрамора, селенита, серпентинита и оникса. Широко использован кальцит, малахит и разноокрашенный кварц. Особым искусством отличаются фигурки слона, в которых с ювелирной точностью внутри тела большого животного вырезан маленький слоненок. Поражает мастерство екатеринбургских камнерезов, которые на простых кристаллах горного хрусталя поместили миниатюрных лягушек, змей, тараканов.

Наиболее высокое мастерство и разнообразие камня прослеживается в мозаичных фигурках, в которых пред-

ставлена целая коллекция различных минералов и горных пород. Наиболее популярным и самым большим образцом в коллекции является «Кеша»: на постаменте из кальцита высотой в 66 сантиметров сидит попугай из лазурита, бирюзы, кахалонга, кальцита, оникса, зелено-го кварца, обсидиана.

Десятилетие для музейной экспозиции — это много или мало? После открытия зала выставку посетило более 25 тысяч гостей музея. Свои впечатления от выставки, от разнообразия и красоты камня оставляют в книге отзывы школьники, студенты, люди разных профессий, пенсионеры. Вот один из отзывов, оставленный студентами факультета искусств Сыктывкарского государственного университета: «Мы, люди искусства, пополнили свой багаж фантазии после посещения прекраснейшей выставки».

В музее ведется работа с коллекционерами и камнерезами Республики Коми. Но хочется отметить, что Александр Павлович был первым, кто не просто сделал временную выставку, а передал свою коллекцию в музей.

На мероприятии были также представлены изделия, автором которых является Алексей Калмыков, ученик Майи Волковой, ее произведения с цветным камнем и кожей широко известны в Республике Коми. Одной из работ А. Калмыкова является книга отзывов в музее. Необычная техника, индивидуальный стиль делают такие работы неповторимыми и всегда узнаваемыми.

Хочется пожелать «Ковчегу» долгого и счастливо-го плавания! Надеемся, что наше сотрудничество с А. П. Боровинских и с другими коллекционерами Республики Коми будет успешным и продолжительным.

И. С. Астахова

руководитель Геологического музея им. А. А. Чернова

**С праздником, дорогие наши женщины!
Все полевые цветы вам!**





X-RAY SPECIALIST ON CLAYS

To the 85th anniversary of V. V. Khlybov

Vladimir Vasilyevich Khlybov (1932–2008) — a well-known expert on the X-ray imaging of mineral raw, candidate of geological and mineralogical sciences, honored worker of Komi Republic, was awarded with the medal «Veteran of Labor». He was one of those who launched X-ray structural researches at the Institute of Geology and pioneer of the X-ray diffraction analysis of clay minerals. The results of his researches of clay minerals allowed reconsidering the resource potential of the Southern Komi Republic and were the basis for the development of many of the most important industries including building, paper and electrical engineering industries. Vladimir Vasilyevich is the author of more than 70 scientific works including monographs «Clay minerals of Triassic deposits of the Northeast of the European part of the USSR» (1989) and «Clays, clay minerals of the southern part of Komi Republic and their application value» (2003).

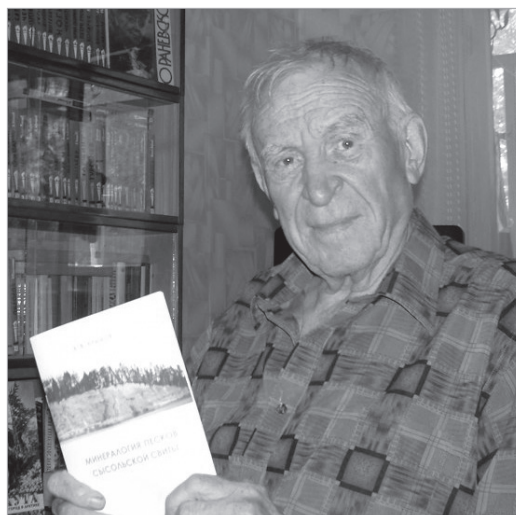
РЕНТГЕНОГРАФ ГЛИН

К 85-летию со дня рождения В. В. Хлыбова

Владимир Васильевич Хлыбов (1932–2008) — известный специалист по рентгенографии минерального сырья, кандидат геолого-минералогических наук, заслуженный работник Республики Коми, награжден медалью «Ветеран труда».

Владимир Васильевич был одним из тех, кто организовал рентгеноструктурные исследования в Институте геологии и стоял у истоков создания методов рентгеноструктурного анализа глинистых минералов, которым свойственны тонкая дисперсность, переменный состав, разнообразие структур и свойств.

Богатейший материал более 50 экспедиций по Кировской области, Республике Коми, Среднему и Северному Тиману, Новой Земле позволил впервые показать важ-



ность рентгеновских исследований глинистых минералов в литологических однородных толщах триаса и юры для их расчленения и корреляции, что способствовало развитию геологических представлений в области литологии и стратиграфии мезозойских отложений. Работы Владимира Васильевича по изучению глинистых минералов позволили пересмотреть ресурсный потенциал юга Республики Коми и послужили основой для развития многих важнейших отраслей промышленности, в том числе строительной, бумажной, электротехнической. С усилением технологической направленности деятельности лаборатории рентгеноструктурного анализа он успешно применил свое прекрасное знание минералогии и кристаллохимии глин к испытаниям их технологических свойств и анализу соответствующей сырьевой базы для производства кирпича, бетона, керамзита и других строительных материалов и керамики. Результаты его исследований нашли отражение более чем в 70 научных публикациях и обобщены в монографиях «Глинистые минералы триасовых отложений северо-востока европейской части СССР» (1989) и «Глины, глинистые минералы южного региона Республики Коми и их прикладное значение» (2003).

К. г.-м. н. Д. Шушков



Ответственный за выпуск:
В. А. Матвеев

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

Компьютерная верстка:
Р. А. Шуктомов

Свид. о рег. средства массовой информации
ПИ № ФС77-56817 от 29.01.2014
Подписано в печать 28.04.2017

Тираж 180
Заказ 1039
Адрес редакции и издательства:
167982, Сыктывкар, Первомайская, 54

Тел.: (8212) 24-51-60

Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru

На обложке также использованы фото И. Астаховой, Ю. Глухова, И. Голубевой, Р. Шуктомова