Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. 22. С. 240–244

Гипергенные минералы в условиях разработки месторождения габбро-долерита Тит-Ары, Центральная Якутия

Васильева Т. И. [1], **Дьяконов А. Д.** [1, 2]

[1] *Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, vasilevatig@yandex.ru*

[2] *Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, dyakonov_ad@rambler.ru*

Аннотация. Изучен минеральный состав налетов, образовавшихся в зоне контакта дайки габбро-долеритов с карбонатными породами в карьере месторождения Тит-Ары, Центральная Якутия. Во всех налетах обнаружены кварц и доломит, в бежевых разновидностях дополнительно выявлены плагиоклаз и монтмориллонит. Основной акцент сделан на гипергенных минералах: светло-бурые налеты состоят из гетита (FeOOH), образующегося при окислении железосодержащих силикатов; белые налеты включают гиббсит, алюмогидрокальцит и гидрокалюмит, формирующиеся в щелочных условиях при выветривании алюмосиликатов; бежевые налеты содержат ярозит и каолинит, совместное образование которых характерно для переходных зон между кислыми и нейтральными средами. Установлено, что светло-бурые и белые налеты преобладают в верхних частях склонов, а бежевые – в понижениях рельефа, что связано с особенностями криогенных процессов, приводящих к концентрации ионов и последующей кристаллизации минералов. Термический анализ гидрокалюмита выявил сложный механизм его разложения с последовательной потерей воды, карбонатных и хлоридных групп. Полученные результаты важны для понимания гипергенных процессов на контакте карбонатных и магматических пород и могут быть использованы для оценки геохимических условий в изучаемом объекте.

Ключевые слова: гипергенные минералы, гетит, ярозит, гидрокалюмит, алюмогидрокальцит, криогенные процессы, месторождения общераспространенных полезных ископаемых.

Hypergene minerals in the development conditions of the Tit-Ary gabbro-dolerite deposit, Central Yakutia

Vasileva T. I. [1], **Dyakonov A. D.** [1, 2]

[1] *Institute of Diamond and Noble Metals Geology SB RAS, Yakutsk, vasilevatig@yandex.ru*

[2] *North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, dyakonov_ad@rambler.ru*

Abstract. The mineral composition of the deposits formed in the contact zone of the gabbro-dolerite dike with carbonate rocks in the quarry of the Tit-Ary deposit, Central Yakutia, was studied. Quartz and dolomite were found in all the deposits, plagioclase and montmorillonite were additionally identified in the beige varieties. The main emphasis is on the hypergene minerals: light brown deposits consist of goethite (FeOOH), formed by the oxidation of iron-containing silicates; white deposits include gibbsite, aluminohydrocalcite and hydrocalumite, formed under alkaline conditions during the weathering of aluminosilicates; Beige deposits contain jarosite and kaolinite, the joint formation of which is typical for transition zones between acidic and neutral environments. It was found that light-brown and white deposits predominate in the upper parts of the slopes, and beige ones – in relief depressions, which is associated with the peculiarities of cryogenic processes leading to the concentration of ions and subsequent crystallization of minerals. Thermal analysis of hydrocalumite revealed a complex mechanism of its decomposition with a sequential loss of water, carbonate and chloride groups. The results obtained are important for understanding hypergene processes at the contact of carbonate and igneous rocks and can be used to assess the geochemical conditions in the studied object.

Keywords: hypergenic minerals, goethite, jarosite, hydrocalumite, aluminum hydroxide carbonate, cryogenic processes, widespread mineral resources.

Введение

Карьер месторождения габбро-долеритов Тит-Ары расположен в 1.5 км к северу от села Тит-Ары (Хангаласский улус, Якутия). Оно приурочено к террасированному склону долины реки Лены на высоте 136.20–136.80 м (условная система высот карьера). Координаты участка: 61°14′04,75″ с. ш., 127°46′13,37″ в. д. Вскрытые карьером дайкообразные и пластовые интрузии сложены магматическими

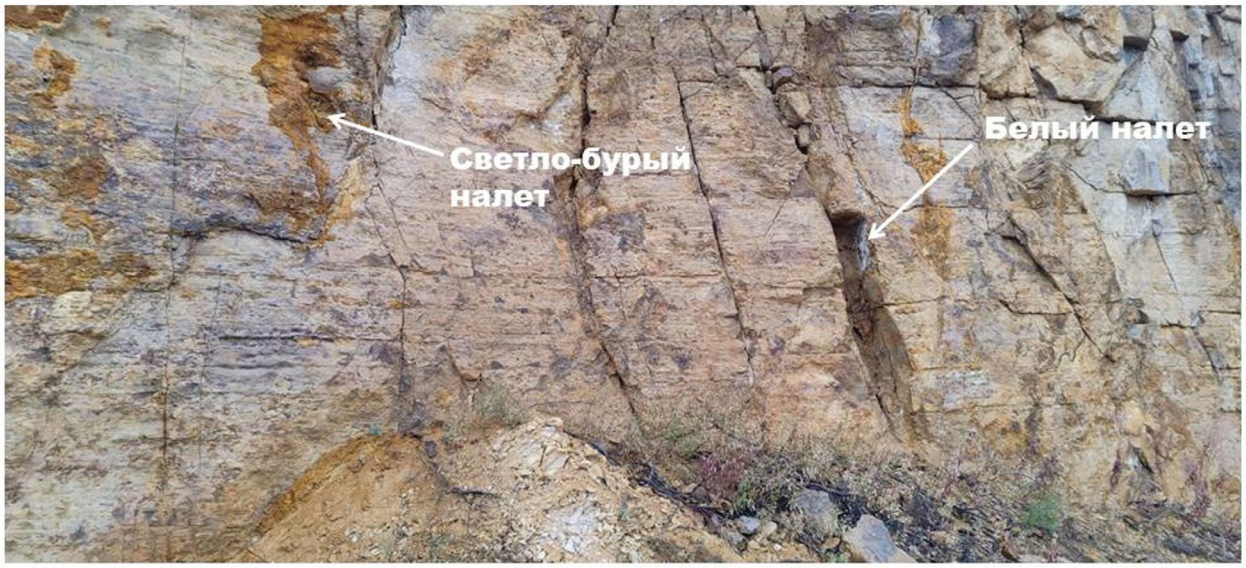

Рис. 1. Гипергенные налеты (светло-бурый и белый) на поверхности карбонатных пород в зоне контакта с габбро-долеритами

Fig. 1. Hypergene coatings (white and brick-colored) on the surface of carbonate rocks in the contact zone with gabbro-dolerites

породами основного состава, характерными для траппов Сибирской платформы (Лебедев и др., 2022), они состоят из плагиоклаза, минерала из группы пироксенов, кварца и минерала из группы монтмориллонита. Вмещающие породы представлены известняками и доломитами кембрия.

В стенках карьера опробованы светло-бурые и белые налёты на обнажениях карбонатных пород (рис. 1), а на полотне карьера, где вскрываются магматические породы выявлены бежевые высолы. Их образование, вероятно, связано с выщелачиванием карбонатов, переотложением вторичных минералов и гидротермальными процессами вдоль контакта магматических и осадочных пород. Подобные налёты могут быть использованы как потенциальные индикаторы гидротермальных и гипергенных процессов. Изучение их природы важно для понимания геохимических процессов в зоне окисления и гипергенеза. Миграция элементов (Cr, Ba, Cu, Zn, V и Ni), характерных для магматических пород из минерализованных зон способна аккумулироваться и влиять на прилегающие территории, включая почвы и воду, поэтому оценка их воздействия на экосистемы актуальна при разработке карьера. Кроме того, исследование этих образований помогает разобраться в особенностях выветривания и минералообразования в условиях якутской криолитозоны. Полученные данные могут быть полезны для поиска полезных ископаемых и мониторинга ландшафтов в районах добычи строительных материалов.

Объекты и методы исследования

Первый тип налётов формирует крупные высолы и корки на поверхности карбонатных пород, особенно на участках с активным испарением влаги. Цвет светло-бурый, структура тонкозернистая, рыхлая. Зёрна неправильной формы, при срастании образуют сплошные массы (рис. 2 а).

Второй тип налётов обнаружен по трещинам и нарушениям во вмещающих карбонатных породах. Характеризуется прожилково-корочковой структурой, местами образует порошковатые скопления белого цвета. Основная масса непрозрачная, но встречаются прозрачные разновидности. Агрегаты тонкозернистые, неправильной формы, формируют сплошные массы (рис. 2 б).

Третий тип выявлен у подножия выходов магматических пород (габбро-долеритов), часто в контакте с рыхлыми отложениями. Представлен плотными или землистыми скоплениями, иногда с включениями обломочного материала бежевого цвета. Мелкозернистый, рыхлый, содержит многочисленные почковидные выделения, формирующие сплошные массы (рис. 2 в).

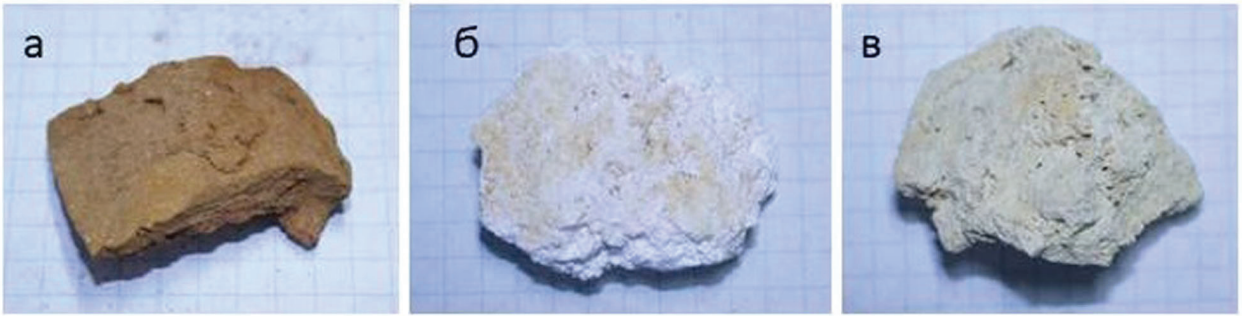

Рис. 2. Внешний вид минеральных налётов: а – светло-бурые корковые; б – белые порошковатые; в – бежевые землистые

Fig. 2. Appearance of mineral coatings: a – white powdery; b – light brown crusty; c – beige earthy

Образцы были исследованы на базе Центра коллективного пользования ИГАБМ СО РАН. Для определения минерального состава использовали метод рентгенофазового анализа с помощью дифрактометра D2 PHASER, при 30 кВ, 10 мА, CuKα-излучение, интервал 4.5–65 ° (2θ °), для идентификации минералов использована база данных PDF-2. Для белого налета дополнительно был проведен анализ на термическом анализаторе STA 449C Jupiter, режим съемки от комнатной температуры до 1000 ° С в инертной среде аргона (аналитик Н. Н. Емельянова ИГАБМ СО РАН). Кислотность почвы измеряли с помощью pH-метра Seven Compact Advanced (Mettler Toledo, Грайфензее, Швейцария) по государственному стандарту (ГОСТ-26483-85).

Результаты и обсуждение

Светло-бурый налет представляет собой гетит (FeOOH), что объясняет его характерную окраску. Образование гетита происходит в процессе окисления железосодержащих силикатов в широком диапазоне значений pH растворов при окислении ионов Fe^{2+} (Яхонтова, Зверева, 2007).

Состав белого налета оказался более сложным: в нем идентифицированы гиббсит γ-$Al(OH)_3$, алюмогидрокальцит $[Ca_4Al_2(OH)_4](CO_3)_2 \cdot 3H_2O$ и гидрокалюмит $Ca_2Al(OH)_6[Cl_{1-x}(OH)_xCO_{3y}] \cdot 3H_2O$, сформировавшиеся в результате взаимодействия продуктов выветривания габбро-долеритов с карбонатными породами. Процесс минералообразования начинается с выветривания плагиоклазов, сопровождающегося высвобождением алюминия и кальция в почвенные растворы. При контакте этих растворов с карбонатными породами происходит нейтрализация кислой среды с повышением pH до 8–9 и насыщение растворов карбонат-ионами. В таких щелочных условиях, поддерживаемых карбонатным буфером, происходит кристаллизация характерных вторичных минералов. Особенно показательно образование алюмогидрокальцита и гидрокалюмита, которые являются надежными индикаторами высоких значений pH (выше 8), тогда как гиббсит может формироваться в более широком диапазоне кислотности (pH 4.5–8.5). Данная минеральная ассоциация однозначно свидетельствует о контактовом взаимодействии между продуктами разложения магматических пород и карбонатным материалом осадочной толщи в специфических условиях криолитозоны, где испарительная концентрация растворов играет существенную роль в процессах минералообразования (Rossi et al., 2020).

Бежевый налет состоит из ярозита $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ и каолинита $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Вероятно, эти минералы образовались в результате осаждения из водных растворов в зоне контакта различных литологических типов. Ярозит является типичным гипергенным минералом, формирующимся в условиях кислых вод (pH < 3) и высокого окислительного потенциала среды (Яхонтова, Зверева, 2007; Cruells, Roca, 2022). Примечательно, что сульфаты в магматических породах представляют собой нетипичное явление, поскольку магматические процессы обычно имеют восстановительный характер. Однако ионы SO_4^{2-} могут появляться в следующих случаях: за счет первичных (эндогенных) источников, включая сульфидные расплавы и флюиды, а также благодаря присутствию летучих компонентов магмы (Коржинский, 1982). Каолинит является продуктом выветривания силикатов. Его образование происходит при pH 4–6 и окислительно-восстановительном потенциале

от +0.1 до +0.4 V в присутствии алюмосиликатов. Условием совместного образования каолинита и ярозита может быть формирование в переходных зонах между кислыми и нейтральными средами, где сочетаются источники Al^{3+} и Fe^{3+} (выветривание высокотемпературных алюмосиликатов) и их последующая нейтрализация путем взаимодействия с карбонатами.

Пространственное распределение налетов показывает, что белые и светло-бурые разновидности тяготеют к верхним частям склонов, где более активно происходят процессы испарения и инфильтрации, в частности инфильтрация Al-содержащих растворов. Бежевые скопления чаще встречаются в понижениях рельефа, где аккумулируются продукты выветривания. Существенную роль в формировании этих образований играют криогенные процессы, характерные для Якутии. Зимнее промерзание приводит к концентрации ионов Fe^{3+}, Ca^{2+}, Al^{3+} и CO_3^{2-} в остаточных рассолах, а летнее оттаивание и последующее испарение воды способствует кристаллизации водных алюмокарбонатов, гетита и ярозита в виде налетов на поверхности пород.

Особый интерес представляет гидрокалюмит, отличающийся широкой вариабельностью состава. Термический анализ этого минерала (рис. 3) показал, что его разложение происходит через стадии дегидратации, дегидроксилирования и удаления межслоевого аниона. Потеря гигроскопичной воды происходит до 110 °C с уменьшением массы на 14.27 %. Последующие эндотермические эффекты до 550 °C соответствуют постепенному удалению гидроксильной воды с общей потерей массы 18.03 %. В интервале 600–800 °C наблюдается двухстадийное удаление карбонатов. Окончательное разрушение гидроксидов происходит при высокой температуре, начиная примерно с 900 °C, с потерей массы около 1 %. Наличие небольшого эндотермического пика при 316.0 °C, вероятно, свидетельствует о присутствии примеси гиббсита в образце. Таким образом, данные термического анализа позволяют идентифицировать исследуемый минерал как гидрокалюмит с характерным смешанным анионным составом, включающим гидроксильные (OH^-), карбонатные (CO_3^{2-}) и хлоридные (Cl^-) группы в межслоевом пространстве (Jiménez, 2022).

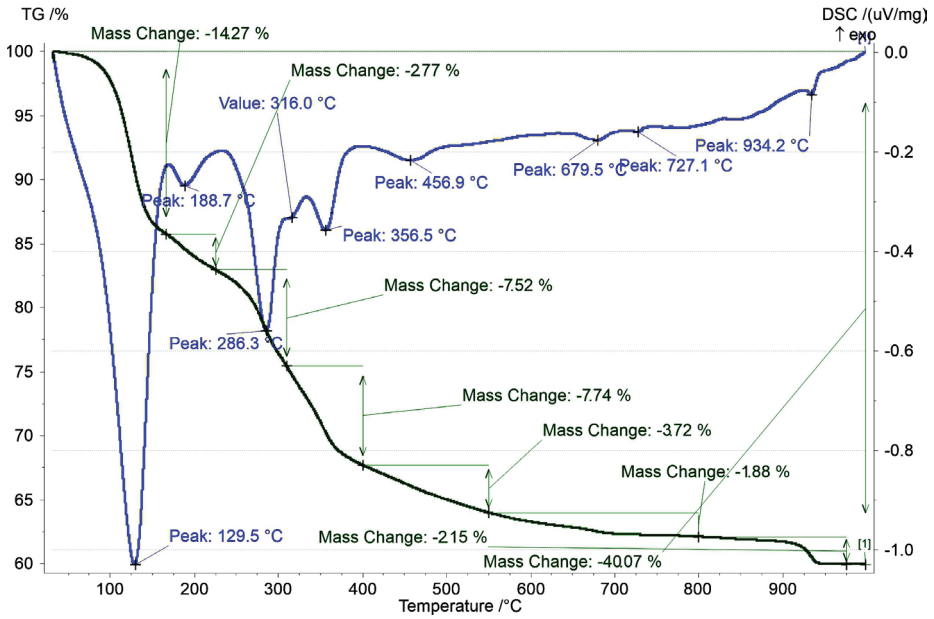

Рис. 3. Термограмма (кривые ТГ и ДТА) белого налета
Fig. 3. Thermogravimetric analysis (TG/DSC curves) of the white coating

Заключение

Проведенное исследование имеет значительную научную и практическую ценность, особенно в контексте изучения минерагении Сибирской платформы и экологических аспектов горнодобывающих районов Якутии. Изученные налеты отражают сложные процессы гипергенеза и могут слу-

жить индикаторами как экзогенных (выветривание), так и эндогенных (гидротермальных) процессов, являясь важными маркерами геохимического режима в карьерных условиях.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов Государственного задания Минобразования РФ № FUFG-2024-0007 «Мантийный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования».

Литература

1. Почвы. Приготовление солевого экстракта и определение ее pH по методу ЦИНАО. ГОСТ-26483-85. Государственный стандарт Союза ССР. Москва: ГОСТ, 1985. 6 с.
2. Коржинский Д. С. Теория метасоматической зональности. М. Изд-во: Наука. 1982. 104 с.
3. Лебедев И. О., Козлов Г. А., Молчанов А. В., Терехов А. В., Лебедева Г. Б., Голикова О. В., Гузев В. Е., Гогин И. Я., Алексеев М. А., Соловьев О. Л., Туркевич А. Б., Шувалов К. О., Кротова-Путинцева А. Е., Кахая В. Г., Семенова З. А., Петров В. В. Л33 Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Анабаро-Вилюйская. Лист P-52. СПб. Изд-во: ВСЕГЕИ, 2022. 290 с.
4. Яхонтова Л. К., Зверева В. П. Минералы зоны гипергенеза. Владивосток. Изд-во: Дальнаука, 2007. 165 с.
5. Cruells M, Roca A. Jarosites: Formation, Structure, Reactivity and Environmental // Metals. 2022. V. 12, No. 802. https://doi.org/ 10.3390/met12050802.
6. Rossi T. M., Campos J. C., Souza MMVM. Synthesis and Characterization of Hydrocalumite: Influence of Aging Conditions on the Structure, Textural Properties, Thermal Stability, and Basicity // Clays and Clay Minerals. 2020. V. 68, No. 4. P. 273–86. https://doi.org/10.1007/s42860-019-00049-6.
7. Jiménez A., Rives V., Vicente M. A. Thermal study of the hydrocalumite–katoite–calcite system // Thermochimica Acta. 2022. V. 713. P. 179242.