



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.63: 552.4 (234.851)

DOI: 10.19110/geov.2025.7.1

Минералы группы кричтонита в метариолитах и апобазитовых породах на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал)

С. А. Онищенко, Е. М. Тропников, В. А. Радаев

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
mine222@ya.ru

На Au-Pd-месторождении Чудное выявлены сложные Fe-Ti-оксиды группы кричтонита. Видовое разнообразие минералов определяется соотношениями между Pb и Sr, а также между Zn, Mn и Y. В метариолитах присутствуют альмейдаит, кричтонит, сенайт и минералы промежуточного состава. Состав наиболее богатого цинком альмейдаита – $(\text{Pb}_{0.44}\text{Sr}_{0.38})_{\Sigma 0.82}(\text{Mn}_{0.65}\text{Y}_{0.30})_{\Sigma 0.95}\text{Zn}_{1.23}(\text{Ti}_{13.67}\text{Fe}^{3+} 5.01)_{\Sigma 18.68}\text{O}_{38}$. Минеральная ассоциация включает мусковит, гематит, рутил, циркон, эшинит-(Y), монацит-(Ce), алланит-(Ce). В апобазитовых гематит-серicitовых породах на контакте с метариолитами обнаружен грамаччиолит-(Y). Состав наиболее богатого иттрием грамаччиолита-(Y) – $\text{Pb}_{0.91}(\text{Y}_{0.50}\text{Mn}_{0.45})_{\Sigma 0.95}(\text{Ti}_{13.13}\text{Fe}^{3+} 6.25)\text{Zn}_{0.25})_{\Sigma 19.63}\text{O}_{38}$. Ассоциирующие минералы: мусковит, гематит, титанит, рутил, циркон и алланит-(Ce). Минералы группы кричтонита выявлены в контурах рудных зон с прожилковой золотофукситовой минерализацией, но локализованы они не в рудных прожилках, а в породной матрице. Образование минералов группы кричтонита связано с метаморфическими процессами в риолитах и контактирующих с ними породах основного состава.

Ключевые слова: альмейдаит, кричтонит, сенайт, грамаччиолит-(Y), эшинит-(Y), риолиты

Minerals of the crichtonite group in metarhyolites and apobasite rocks at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals)

S. A. Onishchenko, E. M. Tropnikov, V. A. Radaev

Institute of Geology FRS Komi SC UB HFS, Syktyvkar, Russia

Complex Fe-Ti oxides of the crichtonite group have been identified at the Chudnoe Au-Pd deposit. The species diversity of minerals is determined by the balance between Pb and Sr, and between Zn, Mn and Y. Metarhyolites contain almeidaite, crichtonite, senaite and minerals of intermediate composition. The composition of almeidaite, which is the richest in zinc, – $(\text{Pb}_{0.44}\text{Sr}_{0.38})_{\Sigma 0.82}(\text{Mn}_{0.65}\text{Y}_{0.30})_{\Sigma 0.95}\text{Zn}_{1.23}(\text{Ti}_{13.67}\text{Fe}^{3+} 5.01)_{\Sigma 18.68}\text{O}_{38}$. The mineral association includes muscovite, hematite, rutile, zircon, aeschynite-(Y), monazite-(Ce), allanite-(Ce). In apobasite hematite-sericite rocks, gramaccioliite-(Y) was found at the contact with metarhyolites. The composition of gramaccioliite-(Y), which is the richest in yttrium, – $\text{Pb}_{0.91}(\text{Y}_{0.50}\text{Mn}_{0.45})_{\Sigma 0.95}(\text{Ti}_{13.13}\text{Fe}^{3+} 6.25)\text{Zn}_{0.25})_{\Sigma 19.63}\text{O}_{38}$. Associated minerals: muscovite, hematite, titanite, rutile, zircon and allanite-(Ce). Minerals of the crichtonite group are found in the contours of ore zones with vein gold-fuchsite mineralization, but they are localized not in ore veins, but in the rock matrix. The formation of minerals of the crichtonite group is associated with metamorphic processes in rhyolites and contacting basic rocks.

Keywords: almeidaite, crichtonite, senaite, gramaccioliite-(Y), aeschynite-(Y), rhyolites

Введение

Минералы группы кричтонита – сложные оксиды, которые описываются общей формулой: $M_0M_1M_2M_3M_4M_5O_{38}$, где $M_0 = \text{Ba}, \text{K}, \text{Pb}, \text{Sr}, \text{La}, \text{Ce}, \text{Na}, \text{Ca}; M_1 = \text{Mn}^{2+}, \text{Y}, \text{U}, \text{Fe}^{2+}, \text{Zr}, \text{Ca}, \text{Sc}; M_2 = \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Mg}, \text{Zn}; M_3 = \text{Fe}^{3+}, \text{Cr}, \text{V}, \text{Mn}^{3+}, \text{Al}$; позиции M_4 и M_5 заняты преимущественно атомами Ti. Кричтониты характеризуются необычайным разнообразием состава. Номенклатура группы основана на комбинации доминирующих катионов в позициях. По преобладанию крупного катиона в позиции M_0 ($\text{Sr}, \text{Pb}, \text{Ba}, \text{Ca}, \text{Na}, \text{K}$ и REE) выделены восемь минеральных видов: кричтонит, сенайт, линдслейт, ловерингит, ландауит, матиасит, давидит-(Ce) соответст-

венно. Среди Sr-Pb-доминантных минералов выявлены минералы, различающиеся заполнением позиции M_1 . У клейстонита $(\text{Pb}, \text{Sr})(\text{U}^{4+}, \text{U}^{6+})(\text{Fe}^{2+}, \text{Zn})_2(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+})_{18}(\text{O}, \text{OH})_{38}$ и мапиквириита $(\text{Sr}, \text{Pb})(\text{U}, \text{Y})\text{Fe}_2(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_{18}\text{O}_{38}$ в позиции M_1 преобладает уран, у дессоита-(Y) $(\text{Sr}, \text{Pb})(\text{Y}, \text{U})(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_{20}\text{O}_{38}$ – иттрий. По сочетанию Pb в M_0 -позиции и Y в M_1 -позиции выделен грамаччиолит-(Y) $(\text{Pb}, \text{Sr})(\text{Y}, \text{Mn})\text{Fe}_2(\text{Ti}, \text{Fe})_{18}\text{O}_{38}$. Для альмейдаита характерно преобладание цинка в позиции M_2 , его формула $\text{Pb}(\text{Mn}^{2+}, \text{Y})\text{Zn}_2(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_{18}\text{O}_{36}(\text{O}, \text{OH})_2$. По преобладанию ванадия и хрома в позиции M_3 минеральными видами являются пазероит $\text{PbMn}^{2+}(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})_2(\text{V}^{5+}, \text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_{18}\text{O}_{38}$ и сарановскит $\text{SrCaFe}^{2+}(\text{Cr}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$ (Расцветаева, 2020).

Для цитирования: Онищенко С.А., Тропников Е. М., Радаев В. А. Минералы группы кричтонита в метариолитах и апобазитовых породах на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. 2025. 7(367). С. 3–15. DOI: 10.19110/geov.2025.7.1

For citation: Onishchenko S. A., Tropnikov E. M., Radaev V. A. Minerals of the crichtonite group in metarhyolites and apobasite rocks at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals). Vestnik of Geosciences, 2025, 7(367), pp. 3–15, DOI: 10.19110/geov.2025.7.1



Минералы группы кричтонита выявлены в гидротермальных жилах, в норитах и анортозитах, в щелочных магматических породах, гранитных пегматитах и карбонатитах (Barkov, 2006; Барков, Никифоров, 2015; Карпов и др., 2016). Обычно эти минералы присутствуют в породах в незначительном количестве, но на месторождении Радиум-Хилл (Австралия) давидит-(La) и давидит-(Ce) добывались для извлечения урана (Черников, 2012). Из многочисленных минералов группы кричтонита для наших целей представляют интерес геологические условия локализации альмейдаита и грамаччиолита-(Y).

Альмейдаит был открыт близ г. Нову-Оризонти в бразильском штате Баия. Черные пластинчатые кристаллы альмейдаита толщиной до 6 мм найдены в измененном даците в 2 м от кварцевой жилы. В ассоциации с альмейдаитом присутствуют кварц, рутил, антаз, гематит, мусковит, ксенотим-(Y) и бастнезит-(La). Альмейдаит рассматривается как продукт реакции гидротермальных флюидов, которые образовали кварцевую жилу, с вмещающим дацитом (Menezes Filho et al., 2015).

Минерал, весьма близкий к альмейдаиту, был обнаружен в пегматитах штата Колорадо (США); описан под названием сенанита, обогащенного Zn и Y (Foord et al., 1984). Минерал находится в срастании с астрофиллитом, муратайтом и ксенотитом, ассоциирует с рибекитом и кварцем. От альмейдаита отличается высоким содержанием Y.

Альмейдаит, описанный как Zn-содержащий сенант, был обнаружен в редкометальных щелочных гранитах Халдзан-Бурэгтэга (Монгольский Алтай). Порода представляет собой микроклин-альбитовый гранит с пойкилокристаллами арфведсонита; альмейдаит находится в срастании с гематитом, флюоритом и кальциевым цирконосиликатом (Карташов и др., 1993).

Грамаччиолит-(Y) был открыт в кварцевых жилах в биотитовом гнейсе герцинского массива Аргентера (провинция Пьемонт, Италия). В ассоциации с ним отмечены альбит, мусковит, антаз, брукит, рутил, фторапатит, ксенотит, пирит, минерал, сходный с синхизитом, и два других члена группы кричтонита, а именно дессауит-(Y) и сенант. Иногда домены сенанита сосуществуют с грамаччиолитом-(Y) в одном и том же кристалле (Orlandi et al., 2004). Позднее грамаччиолит-(Y) был обнаружен на острове Самос в Греции. Минерал встречается в виде сантиметровых кристаллов в брекчированных метабокситах, ассоциирует с диаспором, гематитом, мусковитом, хлоритоидом, кальцитом, рутилом, монацитом-(Ce), бастнезитом-(La) и паризитом-(Ce). Предполагается, что грамаччиолит-(Y) образовался при метаморфизме пород одновременно с хлоритоидом и диаспором (Theye et al., 2010).

В рудовмещающих породах золотопалладиевого месторождения Чудное обнаружены минералы группы кричтонита: альмейдаит, кричтонит, сенант и грамаччиолит-(Y). Целью работы является характеристика этих сложных Fe-Ti-оксидов, определение их роли в процессе минералообразования, соотношения с Au-Pd-руденением.

Геологическое строение

В геологическом отношении район относится к Центрально-Уральскому поднятию и северной части выделяющейся здесь крупной геологической структуры — Ляпинскому антиклиниорию. Месторождение приурочено к осевой зоне Малдинской антиклинали, осложненной разрывными нарушениями. Ядро антиклинали сложено рифей-вендинскими вулканогенными породами эфузивной и субвулканической фаций кислого и основного состава, а крылья — нижнепалеозийскими терригенными отложениями алькесвожской и обеизской свит.

На площади месторождения Чудное распространены риолиты и породы основного состава рифей-вендинского возраста, среди которых преобладают базальты, реже долериты (рис. 1). В виде самостоятельных тел отмечены андезиты, присутствующие как в базитах, так и риолитах. На докембрийских образованиях несогласно залегают кварцевые гравелиты, песчаники и сланцы алькесвожской свиты позднего кембра — раннего ордовика, перекрывающиеся кварцитопесчаниками, конгломератами и гравелитами обеизской свиты раннего ордовика.

В постордовикское время все породы Ляпинского антиклиниория испытали метаморфизм зеленосланцевой фации. Метариолиты представлены массивными, флюидальными и брекчииевидными разностями редкопорфировой структуры, в различной степени рассланцованными. Порфировые вкрапленники калиевого полевого шпата (замещенного альбитом) и кварца слагают от 3 до 10 % породы. Кварц-полевошпатовая цементирующая масса имеет микропойкилобластовую, изредка сферолитовую структуру, характерны струйчатые скопления серицита. В риолитах распространена мелкая вкрапленность гематита, акцессорные минералы представлены цирконом, апатитом, ильменитом, титанитом, рутилом, алланитом, монацитом. Риолиты характеризуются относительно стабильными содержаниями SiO_2 (73–79 мас. %) и Al_2O_3 (10–13 мас. %) при значительных вариациях в содержании щелочей, при этом K_2O чаще всего преобладает над Na_2O . Второстепенным компонентом риолитов является железо, содержание Fe_2O_3 в среднем составляет 1.8 мас. %, FeO — около 1 мас. %. Базиты преобразованы в зеленые сланцы альбит-хлоритового состава с переменным количеством кварца, эпидота и актинолита, характерно наличие магнетита и минералов титана (титанита, ильменита, лейкоксена). Индикаторным является минеральный парагенезис (мусковит-биотит-альбит), характерный для сланцев, образованных по андезитам (Онищенко, Кузнецова, 2019), который соответствует биотитовой субфаации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма.

Вдоль разрывных нарушений риолиты преобразованы в кварц-серийтовые и серийтовые метасоматиты. В зонах контакта риолитов с базитами развиты породы альбит-кварцевого, альбит-кварц-серийтового и гематит-серийтового состава. В районе месторождения фиксируется также протяженная зона глиноземистых серийт-пирофиллитовых и пирофиллит-диаспоровых пород, трассирующая зону разлома (рис. 1). По одним представлениям эти породы являются приразломными метасоматитами (Козырева и др., 2003), по другим — метаморфизованной верхне-

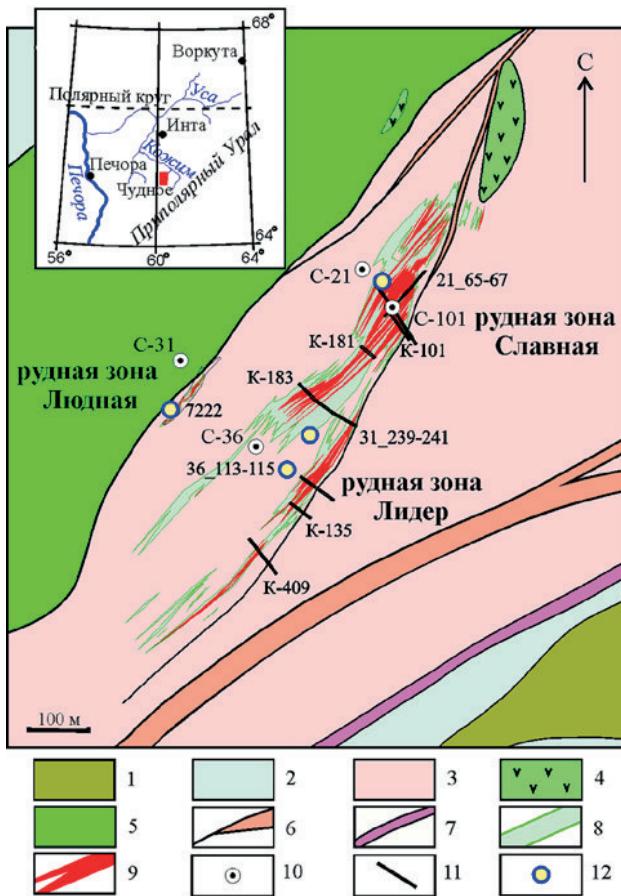


Рис. 1. Геологическая карта месторождения Чудное:

1 — обеизская свита (нижний ордовик): кварцитопесчаники, конгломераты, гравелиты; 2 — алькесвожская свита (верхний кембрий — нижний ордовик): гравелиты, песчаники с прослойями сланцев; 3 — риолиты; 4 — андезиты; 5 — базиты (базальты и долериты); 6, 7 — разрывные нарушения, вдоль которых распространены метасоматиты: 6 — кварц-сертиковые и сертиковые, 7 — диаспор-пирофиллитовые; 8 — зоны фукситовой минерализации; 9 — рудные тела ($\text{Au} > 1 \text{ г/т}$); 10 — скважины; 11 — канавы; 12 — места отбора образцов, содержащих минералы группы кричтонита

Fig. 1. Geological map of the Chudnoe deposit:

1 — Obese Formation (Lower Ordovician): quartzite sandstones, conglomerates, gravelites; 2 — Alkesvozh Formation (Upper Cambrian — Lower Ordovician): gravelites, sandstones with shale layers; 3 — rhyolites; 4 — andesites; 5 — mafic rocks (basalts and dolerites); 6, 7 — faults along which metasomatites are distributed: 6 — quartz-sericite and sericite, 7 — diaspore-pyrophyllite; 8 — zones of fuchsite mineralization; 9 — orebodies ($\text{Au} > 1 \text{ ppm}$); 10 — boreholes; 11 — trenches; 12 — sampling locations containing minerals of the crichtonite group

кембрийской линейной корой выветривания по рифей-вендинским вулканитам (Озеров, 1996).

Золотое оруденение, относящееся к типу минерализованных прожилковых зон, приурочено к трещиноватым и брекчированным риолитам. Рудные зоны имеют северо-восточное простирание и крутое северо-западное падение. Золоторудные зоны Славная и Лидер протягиваются в центральной части месторождения, вблизи контакта риолитов с базитами расположена маломощная зона Людная.

Самородное золото и минералы палладия приурочены главным образом к прожилкам Cr-содержащего

мусковита (фуксита) в риолитах. Толщина фукситовых прожилков колеблется от долей миллиметра до 1—1.5 см. Фуксит представлен тонкочешуйчатыми агрегатами зеленого цвета, обычное содержание Cr_2O_3 в минерале 1—7 мас. %. Вместе с фукситом в прожилках присутствуют алланит, кварц, альбит, отмечаются кальцит, калиевый полевой шпат, титанит, апатит, цинкохромит и другие минералы. Золото образует в фуксите выделения чешуйчатой, уплощенной и неправильной форм, размер их варьирует от 1 мкм до 2 мм, крайне редко до 8 мм.

Самородное золото характеризуется значительными вариациями состава и строения. Содержание Au заключено в интервале от 65.8 до 92.7 мас. %, Ag — от 0.4 до 33.8 мас. %, почти всегда присутствует Cu — до 12.7 мас. % и Pd — до 2.9 мас. %, отмечается Hg (Тарбаев и др., 1996; Palyanova et al., 2021; Онищенко, Кузнецов, 2023). Самородное золото формировалось в виде гомогенного Au-Ag-Cu-твердого раствора при температуре выше 220 °C. При понижении температуры в зависимости от исходного состава твердый раствор остается гомогенным либо (при содержании Cu более 1.1—2.5 мас. %) распадается на две или три фазы. Матрица в структурах распада имеет Ag-Au-состав, пластинки соответствуют фазам Au_3Cu и AuCu .

Основные Pd-минералы месторождения — изомертиит/псевдомертиит $\text{Pd}_{11}\text{Sb}_2\text{As}_2$ и мертиит $\text{Pd}_8\text{Sb}_{2.5}\text{As}_{0.5}$, второстепенные — атенеит $\text{Pd}_2(\text{As}_{0.75}\text{Hg}_{0.25})$ и неназванный минерал Pd_6BiSe , отмечается Pt-минерал — сперрилит PtAs_2 (Онищенко, Кузнецов, 2024).

Вопросы датирования Au-Pd-оруденения месторождения Чудное рассмотрены в работе А. В. Козлова с соавторами (2024). Основываясь на результатах изотопно-геохронологических исследований с учетом особенностей геологического развития Приполярного Урала, авторы связывают образование месторождения Чудное с кембрийским этапом эндогенной активизации (около 500 млн лет), который соответствует началу рифтогенной стадии уралид.

По заключению В. Л. Андреичева (2010), в постордовикское время все породы Ляпинского антиклинария испытали зеленосланцевый метаморфизм (400 млн лет) и однофациальный диафторез (250 млн лет). К последнему рубежу приурочены большинство K-Ar-датировок пород, а также Rb-Sr-изохронные возрасты по минералам из некоторых гранитных массивов.

На месторождении Чудное датировка около 249 млн лет получена Rb-Sr-методом по изохроне, построенной на результатах анализа проб альбита, фуксита, мусковита и риолита (Кузнецов, Андреичев, 1998).

Датирование фуксита месторождения Чудное методом $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ по двум пробам из рудной зоны Славной показало возраст 254 и 265 млн лет. Обе датировки интерпретируются как гидротермально-метасоматические события, наложившиеся на фуксит с переустановкой изотопной системы Ar. Появление высокотемпературных ступеней на спектре кажущихся возрастов дало основание предполагать, что фуксит древнее 300 млн лет (Моралев и др., 2005а).

Таким образом, Rb-Sr-изохронный возраст (249 млн лет) и $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -возраст (254 и 265 млн лет) отражают этап метаморфических преобразований пород месторождения Чудное в целом и золотофукситовых прожилков в частности.



Материал и методы исследований

Строение и минеральный состав пород изучались в керне скважин, в петрографических шлифах, в полированных шлифах руд и концентратов тяжелых минералов, монтированных в эпоксидной смоле. Минералы группы кричтонита обнаружены в метариолитах при изучении тяжелых электромагнитных фракций, полученных из измельченного до 1 мм материала керновых проб 21_65-67, 31_239-241, 36_113-115 (номер скважины и интервал опробования в м) и в апобазитовых породах из зоны контакта риолитов и базитов (обр. 7222).

Лабораторные исследования проведены в Институте геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Состав минералов определялся на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMН с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (оператор Е. М. Тропников) и электронном микроскопе KYKY EM-6900 с энергодисперсионным спектрометром Xplore 30 Oxford Instruments (оператор В. А. Радаев). Напряжение 20 кВ, диаметр электронного зонда 1 мкм. Время набора спектров составляло 60–80 сек (600 тыс. импульсов). Эталоны – чистые металлы для Au, Ag, Pd, Fe, Cr, Zn, Ti, Mn, Y, V, Nb и Sn, PbTe для Pb, SrF₂ для Sr, KBr для K, альбит для Na, LaB₆ для La, CeO₂ для Ce, ThO₂ для Th, волластонит для Ca, MgO для Mg, Al₂O₃ для Al. Погрешность определения (мас. %): PbO – 0.2, SrO – 0.15, ZnO – 0.15, MnO – 0.1, Y₂O₃ – 0.2.

Коэффициенты в формулах минералов (далее кф = арфу) группы кричтонита рассчитывались на 38 атомов кислорода, все железо считалось трехвалентным. Основанием для этого послужили результаты изучения альмейдайта, в котором, по данным месбауэровской спектроскопии, почти все железо находится в трехвалентном состоянии (Menezes Filho et al., 2015).

В связи с небольшими размерами зерен монацита, заключенных в альмейдайте, при микрозондовом анализе в некоторых случаях захватывается материал матрицы. Компоненты, содержащиеся во вмещающем минерале (TiO₂ до 1.5, FeO до 0.7 мас. %), а также эквивалентное количество SrO (до 0.08 мас. %) вычтены из первичных результатов анализов монацита, сумма компонентов в этих анализах приведена к 100 мас. %. Формула монацита рассчитывалась на 4 атома кислорода.

Расчет содержаний FeO и Fe₂O₃ в алланите выполнен на 8 катионов и 25 положительных зарядов (Armbruster et al., 2006). Формула оксидов Y-Ti-Nb-состава рассчитывалась на 3 катиона.

Результаты

Минералы группы кричтонита на месторождении Чудное обнаружены в двух геологических обстановках: в метариолитах и в значительно преобразованных базитах на контакте с риолитами (рис. 1). Состав минералов варьирует; в метариолитах преимущественно распространены разности, близкие к альмейдайту, для апобазитовых гематит-серицитовых пород более характерны минералы, близкие к грамаччиолиту-(Y). Минералы группы кричтонита ассоциируют с рядом REE-минералов, с некоторыми из них находятся в срастании.

Минералы группы кричтонита

Метариолиты представляют собой темно-лиловые, серые и светло-оливковые полосчатые породы, рассланцованные, местами брекчированные, в некоторых случаях содержащие прожилки кварца.

В метариолитах минералы группы кричтонита присутствуют в виде изометричных или удлиненных зерен размером от 20 до 250 мкм; находятся в срастании с мусковитом, калиевым полевым шпатом, гематитом, монацитом, рутилом, цирконом, альбитом, кварцем (рис. 2). Кроме того, в этих породах отмечаются сложные оксиды Y-Ti-Nb-состава и алланит. Для минералов группы кричтонита характерен черный цвет и раковистый излом, в сколе они напоминают ильменит. Отражение в видимом свете заметно ниже, чем у гематита, примерно соответствует рутилу, внутренние рефлексы не наблюдались, минералы изотропны, что, видимо, является следствием их метамиктного преобразования, в крупных зернах проявлены концентрические трещины. В отраженных электронах минералы более светлые по сравнению с гематитом.

В составе минералов группы кричтонита преобладают TiO₂ и Fe₂O₃, содержания PbO, SrO, ZnO, MnO и Y₂O₃ испытывают колебания, отражая изоморфные замещения в соответствующих позициях структуры. Составы минералов заключены между альмейдайтом, кричтонитом и сенайтом. Минеральные зерна могут иметь относительно выдержаный состав, но чаще отмечаются его вариации, свидетельствующие о неоднородном строении, что хорошо заметно в отраженных электронах, особенно при повышенном контрасте.

К альмейдайту отнесены разности с преобладанием Pb над Sr и содержанием Zn, превышающим

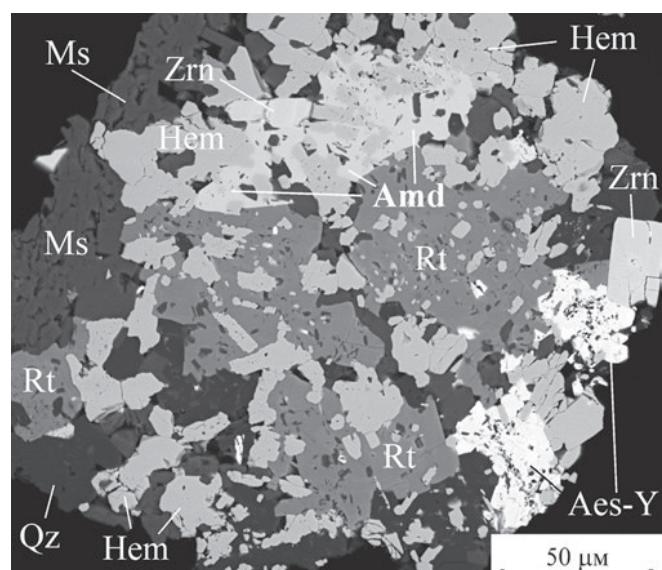


Рис. 2. Альмейдайт в перекристаллизованном риолите (отраженные электроны). Полированный шлиф 21_65-67. Amd – альмейдайт, Hem – гематит, Rt – рутил, Zrn – циркон, Aes-Y – эшинит-(Y), Ms – мусковит, Qz – кварц
Fig. 2. Almeidaite in recrystallized rhyolite BSE image. Polished section 21_65-67. Amd – almeidaite, Hem – hematite, Rt – rutile, Zrn – zircon, Aes-Y – aeschynite-(Y), Ms – muscovite, Qz – quartz



1.00 в коэффициенте в формуле минерала (кф) (Расцветаева и др., 2014; Menezes Filho et al., 2015). Альмейдайтом являются мелкие зерна в полиминеральном агрегате перекристаллизованного риолита (рис. 2, табл. 1, ан. 1, 2). Наиболее высокое содержание цинка (1.23 кф Zn, 5.4 мас. % ZnO) отмечено в одном из зерен (табл. 1, ан. 3), в другой части зерна содержание Zn ниже (1.06 кф), при этом Sr преобладает над Pb.

Зерна промежуточного состава между альмейдайтом и кричтонитом, в которых содержание Zn превышает 1.00 кф, но Sr преобладает над Pb, довольно

распространены (рис. 3, б, табл. 1, ан. 4, 5). К **кричтониту** относятся участки таких зерен, в которых Sr преобладает над Pb, но содержание Zn меньше 1.00 кф (рис. 3, б, табл. 1, ан. 6).

Промежуточный состав между альмейдайтом и кричтонитом наблюдается в зерне (рис. 3, а), в котором, по данным четырех анализов, Sr (0.40–0.57 кф) преобладает над Pb (0.20–0.37 кф), при этом в трех точках содержание Zn немного превышает 1 кф, а в одной оно меньше единицы (0.83 кф), т. е. соответствует кричтониту. Во всех анализах зерна фиксируется примесь Cr_2O_3 (0.8–1.2 мас. %).

Таблица 1. Состав минералов группы кричтонита (мас. %)
Table 1. Composition of minerals of the crichtonite group (wt. %)

Оксид Oxide	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PbO	8.70	8.26	5.33	5.44	4.50	2.83	5.25	10.73	10.61	10.87	9.89	6.98
SrO	1.01	1.06	2.12	2.78	2.97	3.59	1.96	0.0	0.0	0.0	0.0	2.08
CaO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.22	0.0
ZnO	4.87	4.64	5.39	5.28	5.03	3.77	3.29	1.02	1.05	0.96	1.24	2.21
MnO	1.46	1.44	2.46	2.05	2.62	1.72	3.97	1.56	1.68	1.80	1.11	1.53
Fe_2O_3	18.80	22.06	21.47	20.16	19.74	23.69	24.60	26.33	26.11	26.22	18.30	24.83
Y_2O_3	2.20	2.66	1.83	2.07	1.38	2.67	0.0	2.80	2.92	2.74	2.56	2.54
Yb_2O_3	0.43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.75	0.0
UO_2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.05	0.0
Cr_2O_3	0.33	0.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TiO_2	59.23	56.43	58.63	62.46	63.62	60.71	58.81	54.65	54.85	54.69	58.91	55.02
SnO_2	1.04	0.65	0.0	0.37	0.22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V_2O_3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.46	0.0	0.42	0.0	0.69
Nb_2O_5	0.34	0.49	0.0	0.55	0.52	0.26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Σ	98.41	97.88	97.23	101.16	100.60	99.24	97.88	97.55	97.22	97.70	95.03	95.88

Коэффициенты в формуле ($O = 38$) / Coefficient in formula ($O = 38$)

Pb	0.73	0.70	0.44	0.43	0.36	0.23	0.43	0.92	0.91	0.93	0.86	0.60
Sr	0.18	0.19	0.38	0.48	0.51	0.62	0.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.38
Ca	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08	0.0
Zn	1.12	1.08	1.23	1.16	1.10	0.83	0.74	0.24	0.25	0.23	0.30	0.52
Mn	0.39	0.38	0.65	0.52	0.65	0.43	1.03	0.42	0.45	0.48	0.30	0.41
Fe	4.42	5.22	5.01	4.50	4.38	5.31	5.65	6.30	6.25	6.27	4.45	5.94
Y	0.37	0.45	0.30	0.33	0.22	0.42	0.00	0.47	0.50	0.46	0.44	0.43
Yb	0.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.07	0.0
U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.17	0.0
Cr	0.08	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ti	13.91	13.36	13.67	13.94	14.12	13.60	13.49	13.06	13.13	13.07	14.33	13.16
Sn	0.13	0.08	0.0	0.04	0.03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10	0.0	0.09	0.0	0.14
Nb	0.05	0.08	0.0	0.08	0.08	0.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Примечания: 1–3 – альмейдайт; 4–6 – зерно неоднородного строения (рис. 3, б); 4–5 – альмейдайт-кричтонит, 6 – кричтонит; 7 – сенайт; 8–11 – зерна неоднородного строения (рис. 4): 8, 9, 11 – грамаччиолит-(Y), 10 – грамаччиолит-(Y)-сенайт; 12 – грамаччиолит-(Y) (Козырева, Швецова, 2010)

Notes: 1–3 – almeidaite; 4–6 – grains of heterogeneous structure (Fig. 3, b); 4–5 – almeidaite-crichtonite, 6 – crichtonite; 7 – senaite; 8–11 – grains of heterogeneous structure (Fig. 4): 8, 9, 11 – gramaccioliite-(Y), 10 – gramaccioliite-(Y)-senaite; 12 – gramaccioliite-(Y) (Kozyreva, Shvetsova, 2010)



Изменчивость состава проявлена также в зерне (рис. 3, с), в котором, по данным двух анализов, Pb (0.43–0.48 кф) преобладает над Sr (0.31–0.40 кф), при этом в одной точке содержание Zn составляет 1.11 кф, что соответствует альмейдайту, во второй содержание Zn составляет 0.86 кф, что отвечает промежуточному составу между альмейдайтом и сенайтом.

Сенайтовая составляющая, обусловленная наличием марганца, присутствует во всех зернах, но собственно **сенайт**, в котором содержание Mn более 1 кф в случае преобладания Pb над Sr, зафиксирован в одном из зерен пробы 36_113-115 (табл. 1, ан. 7). Следует отметить, что и в этом случае состав зерна размером 100 мкм не отличается стабильностью, в другой его части минерал является промежуточным между альмейдайтом, кричтонитом и сенайтом. В этой же пробе отмечены зерна, содержащие 0.79–0.98 кф Mn, приближающиеся к составу сенайта.

Апобазитовые гематит-серицитовые породы распространены в зонах контакта с метариолитами. Минералы группы кричтонита обнаружены в мало-мощных (3–10 см), линзах гематит-серицитовых пород, заключенных в риолитах. Для пород характерно высокое содержание титана, железа и калия (проба 7222, мас. %): SiO_2 – 37.70, TiO_2 – 5.80, Al_2O_3 – 21.80, Fe_2O_3 – 18.81, FeO – 1.30, MnO – 0.05, MgO – 0.65, CaO – 1.48, Na_2O – 0.23, K_2O – 8.10, P_2O_5 – 0.17, п.п.п – 3.45, сумма – 99.54.

Минералы группы кричтонита образуют в сериите вкрапленность зерен угловато-изометричной формы размером 15–40 мкм, сопутствующие минералы представлены гематитом, титанитом, рутилом, алланитом. Обычно выделения минералов группы кричтонита имеют неоднородное строение, центральная часть выглядит темнее в видимом свете и отраженных электронах и, кроме того, в ней часто отмеча-

ются включения мусковита (рис. 4). По химическому составу периферическая часть выделений соответствует грамаччиолиту-(Y) со значительной долей сенайтовой составляющей. Для грамаччиолита характерно доминирование свинца, занимающего позицию M0 в структуре минерала, и преобладание Y над Mn, занимающих позицию M1 (Orlandi et al., 2004). Грамаччиолиту-(Y) соответствуют ан. 8 и 9 (табл. 1), в ан. 10 марганца больше, чем иттрия, что свидетельствует о преобладании сенайтовой составляющей в минерале.

Центральная часть выделений грамаччиолита-(Y) отличается неоднородным строением и наличием урана в составе фаз, темные в отраженных электронах участки имеют высокое содержание титана (до 70 мас. % TiO_2) и характеризуются низкой суммой элементов (рис. 4, б). Более светлые участки имеют состав U-содержащего грамаччиолита-(Y) (табл. 1, ан. 11).

Ранее грамаччиолит-(Y) в районе месторождения был обнаружен в аналогичных гематит-серицитовых сланцах, приуроченных к контактовой зоне между риолитами и базитами (Козырева, Швецова, 2010). Состав минерала отличается наличием Sr (табл. 1, ан. 12).

Ассоциирующие минералы

Минералы группы кричтонита в метариолитах ассоциируют с мусковитом, гематитом, рутилом, цирконом и минералами редкоземельных элементов (REE), среди которых отмечены эшинит-(Y), монацит-(Ce) и алланит-(Ce).

Эшинит-(Y), сложный оксид Y-Ti-Nb-состава, характеризуется варьирующими соотношениями между Ti и Nb. Состав минерала неплохо рассчитывается на формулу $(\text{Y}, \text{REE})(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{O}_4$, среди REE преобладают тяжелые лантаноиды (табл. 2, ан. 1–5).

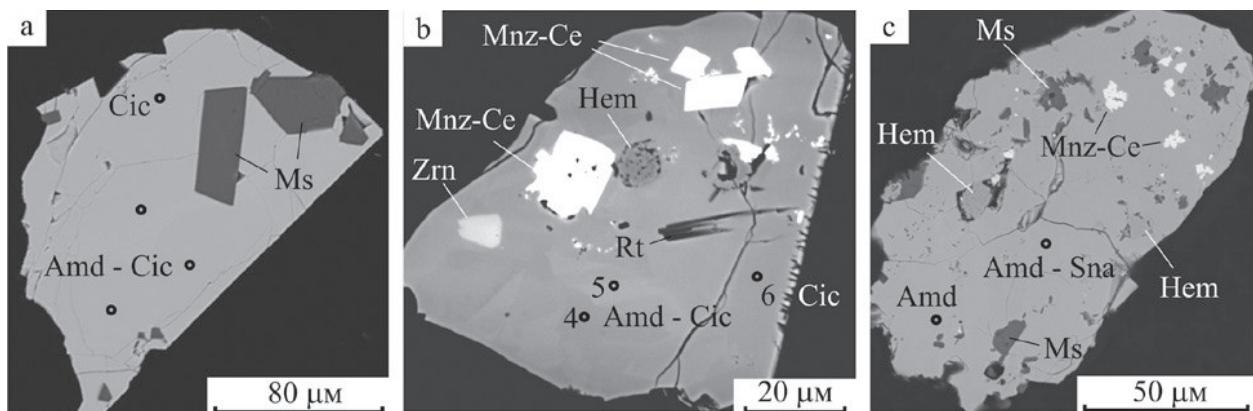


Рис. 3. Альмейдайт-кричтонит-сенайт (вариации состава и минеральные включения):

а — зерно альмейдайт-кричтонитового состава с идиоморфными кристаллами мусковита; б — зерно альмейдайт-кричтонитового состава с включениями циркона, монацита и гематита. Обозначены точки анализа, цифры на рис. 3, б соответствуют номеру анализа в табл. 1. Изображения в отраженных электронах. Полированный шлиф 21_65-67. Amd — альмейдайт, Cic — кричтонит, Sna — сенайт, Mnz-Ce — монацит-(Ce), Hem — гематит, Zrn — циркон, Rt — рутил, Ms — мусковит

Fig. 3. Almeidaite-crichtonite-senaite: composition variations and mineral inclusions:

a — grain of almeidaite-crichtonite composition with idiomorphic crystals of muscovite; b — grain of almeidaite-crichtonite composition with inclusions of zircon, monazite and hematite; c — grain of almeidaite-senaite composition with inclusions of monazite, hematite and muscovite. The analysis points are indicated, the numbers in Fig. 3, b correspond to the analysis number in Table 1. BSE images. Polished section 21_65-67. Amd — almeidaite, Cic — crichtonite, Sna — senaite, Mnz-Ce — monazite-(Ce), Hem — hematite, Zrn — zircon, Rt — rutile, Ms — muscovite

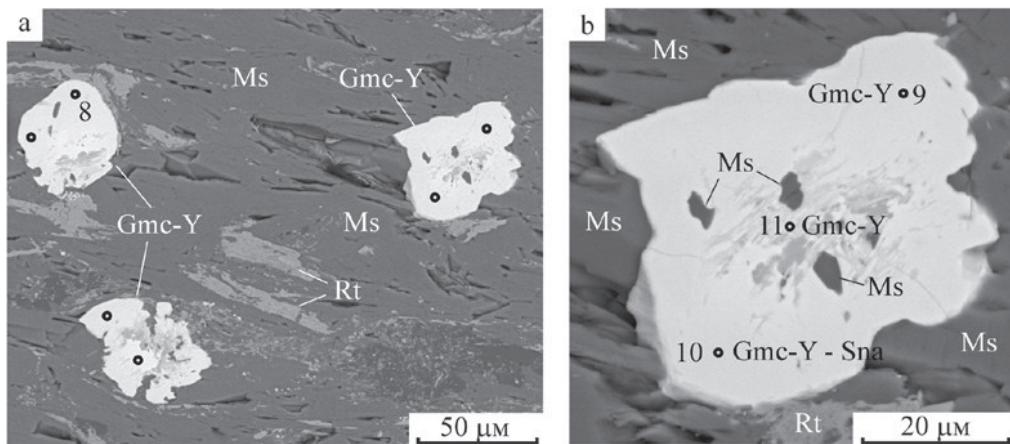


Рис. 4. Грамаччиолиит-(Y) в серицитовом агрегате (а) и детали его строения (б):

Изображения в отраженных электронах. Полированный шлиф 7222. Gmc-Y — грамаччиолиит-(Y), Sna — сенайт, Rt — рутил, Ms — мусковит. Обозначены точки анализов, цифры соответствуют номерам анализов в табл. 1

Fig. 4. Gramaccioliite-(Y) in sericite aggregate (a) and details of its structure (b):

The analysis points are indicated, the numbers correspond to the analysis number in Table 1. BSE images. Polished section 7222. Gmc-Y — gramaccioliite-(Y), Sna — senaite, Rt — rutile, Ms — muscovite

В ассоциации с альмейдаитом эшинит-(Y) обнаружен в перекристаллизованном риолите (рис. 2). В отраженных электронах выглядит ярким, в отраженном видимом свете — темнее рутила. Содержание Y_2O_3 составляет 23.7 мас. %, Nb_2O_5 — 3.6 мас. %, TiO_2 — 47.0 мас. % (табл. 2, ан. 1).

Единичные зерна эшинита-(Y) присутствуют в той же пробе метариолита, где обнаружены минералы группы кричтонита. Для эшинита-(Y) характерно неоднородное строение, хорошо заметное в отраженных электронах при повышенном контрасте (рис. 5, а). Вариации состава значительны (мас. %): Y_2O_3 — 12.9—22.8, Nb_2O_5 — 13.9—17.4, ThO_2 — 3.2—11.2, TiO_2 — 32.8—40.2 (табл. 2, ан. 2—5). Наиболее яркой в отраженных электронах разности эшинита-(Y) соответствует высокое содержание ThO_2 . Ранее под названием поликраз-(Y) сложный оксид $\text{Y}-\text{Ti}-\text{Nb}$ -состава указывался в риолитах рудной зоны Славной (мас. %): Y_2O_3 — 12.0, Nb_2O_5 — 5.2, TiO_2 — 45.9, ThO_2 — 1.7 (Моралев и др., 2005б).

Монацит-(Ce) встречается в срастании с минералами группы кричтонита, по отношению к которым в некоторых случаях отчетливо идиоморфен (рис. 3, б), в других случаях этого не наблюдается (рис. 3, с). В концентратах тяжелых минералов встречается также в виде сростков кристаллов (рис. 5, б). Состав довольно постоянен, эпизодически фиксируются примеси As и S, замещающие фосфор в структуре минерала (табл. 3). Монацит является распространенным REE-минералом в метариолитах, отмечается в золотофукситовых прожилках (Моралев и др., 2005б; Онищенко и др., 2024).

Алланит-(Ce) является наиболее распространенным REE-минералом в метариолитах, часто встречается в золотофукситовых прожилках (Тарбаев и др., 1995; Моралев и др., 2005б; Онищенко и др., 2024). В пробах метариолитов, содержащих минералы группы кричтонита, алланит также присутствует, но их совместных срастаний не обнаружено. Алланит имеет неоднородное строение, хорошо заметное в отраженных электронах. Нередко в зернах алланита проявляются элементы зонального строения. Так, в зернах алланита, заключенных в мусковитовой массе, от-

носительно светлая центральная часть сменяется более темной краевой частью и окружается узкой светлой периферической каймой (рис. 5, с; табл. 4, ан. 1—3). Неоднородное строение алланита ярко проявлено в зерне (рис. 5, д; табл. 4, ан. 4—5). Более светлые в отраженных электронах зоны имеют более высокие содержания REE. Все разности алланита-(Ce) содержат заметную долю эпидотовой составляющей, которая проявляется в повышенном содержании кальция и наличием трехвалентного Fe.

Рутил содержит 0.5—2.0 мас. % Nb_2O_5 и до 1.5 мас. % FeO . Для гематита характерна примесь TiO_2 (1.3—5.0, иногда до 10.9 мас. %), изредка отмечается Cr_2O_3 (до 0.4 мас. %).

Минералы группы кричтонита в *апобазитовых гематит-серицитовых породах* ассоциируют с мусковитом, гематитом (2 мас. % TiO_2), титанитом, рутилом (Nb не обнаружен) цирконом и алланитом-(Ce). Зерна последнего размером до 150 мкм содержат обычно многочисленные включения чешуек мусковита (табл. 4, ан. 6).

Обсуждение результатов

Минералы группы кричтонита в риолитах месторождения Чудное выявлены в контурах рудных зон с прожилковой золотофукситовой минерализацией. Как отмечалось выше, изучался измельченный материал керновых проб, поэтому в монтированных полированных шлифах совместно присутствуют как обломки вмещающих метариолитов, так и золотоносных прожилков. Минералы группы кричтонита приурочены к матрице пород, поскольку они находятся в срастании с пордообразующими минералами метариолитов: мусковитом, калиевым полевым шпатом, гематитом, монацитом, рутилом, цирконом, альбитом, кварцем. Напротив, в золотоносных фукситсодержащих прожилках, изученных в полированных шлифах по всему месторождению, минералы группы кричтонита не обнаружены.

Самородное золото, присутствующее в пробах метариолитов наряду с минералами группы кричтонита,



Таблица 2. Состав эшинита-(Y) в метариолитах (мас. %)
Table 2. Composition of aeschynite-(Y) in metarhyolites (wt. %)

Оксид Oxide	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Y ₂ O ₃	23.65	22.75	15.46	12.93	17.25	13.62	11.28	16.70	20.12	19.36	20.18	18.64
Ce ₂ O ₃	0.0	0.36	1.44	2.33	1.14	2.33	7.88	0.0	0.0	0.0	1.07	0.97
Nd ₂ O ₃	2.53	2.31	3.21	7.71	4.69	4.35	7.60	2.41	2.16	0.78	2.41	2.92
Sm ₂ O ₃	2.44	1.69	2.07	3.18	2.21	2.44	3.68	2.18	1.90	1.39	1.82	2.38
Gd ₂ O ₃	3.78	3.02	3.29	3.94	3.49	3.50	3.90	3.76	4.20	3.85	3.26	4.30
Tb ₂ O ₃	1.09	0.62	0.0	0.67	0.66	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.04
Dy ₂ O ₃	5.26	4.18	3.25	3.18	3.74	3.60	3.01	3.58	5.10	5.50	3.99	6.07
Ho ₂ O ₃	0.86	0.48	0.53	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.96	1.08	1.54
Er ₂ O ₃	2.24	2.15	1.77	1.20	1.41	1.89	0.0	1.86	2.77	2.68	2.07	2.57
Yb ₂ O ₃	1.76	1.39	0.98	0.62	0.79	1.23	0.0	0.0	1.58	1.77	1.24	1.57
ThO ₂	0.0	3.16	11.17	7.43	5.27	0.0	1.56	10.81	1.46	2.01	2.27	0.0
UO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.01	0.0	1.35	2.02	3.06	2.52	1.91
CaO	0.0	0.26	0.51	0.46	0.34	0.69	1.04	0.0	0.0	0.15	0.25	1.25
TiO ₂	47.03	40.22	32.84	37.69	37.93	39.69	44.48	39.16	40.65	38.00	43.28	42.78
Nb ₂ O ₅	3.64	14.09	17.44	13.88	15.84	9.02	6.97	12.43	10.95	13.52	7.2	6.42
Ta ₂ O ₅	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.89	1.08	0.0	0.0	0.0
WO ₃	0.81	0.79	2.27	0.0	0.0	1.15	0.0	0.0	3.09	1.37	1.07	1.03
Fe ₂ O ₃	1.23	0.57	0.82	0.32	0.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.49	0.51	0.49
V ₂ O ₅	0.0	0.0	0.53	0.0	0.0	0.57	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SiO ₂	0.65	0.0	0.0	0.31	0.35	0.82	1.65	0.0	0.0	0.35	0.52	0.40
Σ	96.97	98.04	97.58	95.85	95.52	93.91	93.05	95.13	97.08	95.24	94.74	96.28

Коэффициенты в формуле (3 катиона) / Coefficients in formula (3 cations)

Y	0.65	0.65	0.49	0.40	0.52	0.42	0.33	0.52	0.60	0.58	0.59	0.53
Ce	0.0	0.01	0.03	0.05	0.02	0.05	0.16	0.0	0.0	0.0	0.02	0.02
Nd	0.05	0.04	0.07	0.16	0.09	0.09	0.15	0.05	0.04	0.02	0.05	0.06
Sm	0.04	0.03	0.04	0.06	0.04	0.05	0.07	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04
Gd	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08
Tb	0.02	0.01	0.0	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02
Dy	0.09	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.05	0.07	0.09	0.10	0.07	0.11
Ho	0.01	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.02	0.03
Er	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.0	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04
Yb	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.0	0.0	0.03	0.03	0.02	0.03
Th	0.0	0.04	0.15	0.10	0.07	0.0	0.02	0.14	0.02	0.02	0.03	0.0
U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.12	0.0	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02
Ca	0.0	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04	0.06	0.0	0.0	0.01	0.02	0.07
Ti	1.83	1.63	1.45	1.63	1.61	1.72	1.83	1.72	1.70	1.62	1.78	1.74
Nb	0.09	0.34	0.46	0.36	0.40	0.23	0.17	0.33	0.27	0.35	0.18	0.16
Ta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.02	0.0	0.0	0.0
W	0.01	0.01	0.04	0.0	0.02	0.0	0.0	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01
Fe	0.05	0.02	0.04	0.01	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.02	0.02	0.02
V	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Si	0.03	0.0	0.0	0.02	0.02	0.05	0.09	0.0	0.0	0.02	0.03	0.02

Примечания: ан. 1 – рис. 2, ан. 2–5 соответствуют точкам анализа на рис. 5, а.
Notes: an. 1 – Fig. 2, an. 2–5 correspond to the analysis points in Fig. 5, a.



довольно разнообразно. В пробе 31_239-241 (рудная зона Лидер) самородное золото медистое, содержит 7.8–12.7 мас. % Cu, 0.4–6.0 мас. % Ag и до 2.3 мас. % Pd, испытывает распад на фазы $\text{Au}_3\text{Cu} + \text{AuCu} + \text{Au}-\text{Ag}$. В пробе 36_113-115 (рудная зона Лидер) самородное золото имеет гомогенное строение, по составу серебристое, интервал содержаний Ag — 6.4–21.5, Cu до 2.1, Pd до 0.8 мас. % (Онищенко, Кузнецова, 2023). В пробе 21_65-67 (рудная зона Славная) преобладающая часть самородного золота имеет гомогенное строение, содержит (мас. %): Ag — 11.8–13.4, Cu — до 0.5, Pd — до 0.9. Единичные частицы гомогенного строения содержат 2.8 мас. % Cu. В частице золота, содержащей 3.2 мас. % Cu, происходит распад твердого раствора с образованием тонких пластинок фазы AuCu в матрице, содержащей 2.4 мас. % Cu.

Гематит-серицитовые породы, в которых обнаружен грамаччиолит, находятся в контуре рудной зоны

Людная, самородное золото приурочено к фукситовым прожилкам в риолитах, гематит-серицитовые породы золота не содержат.

Минералы группы кричтонита — сложные Ti-Fe-оксиды, минеральный вид в которых определяются соотношениями между Pb и Sr, а также между Zn, Mn и Y. Выделяются альмейдайт, кричтонит, сенант и грамаччиолит-(Y), многие зерна имеют промежуточный состав, кроме того, во многих зернах отмечена неоднородность состава. Следует отметить, что в некоторых случаях состав минералов находится вблизи границ между видами и его название зависит от точности анализа. В этом отношении интересен состав альмейдайта (табл. 1, ан. 2), в нем иттрия чуть больше, чем марганца, т. е. намечается переход к альмейдайту-(Y).

Образование грамаччиолита-(Y) в гематит-серицитовых породах вполне определенно трактуется как порфиробластез (рис. 4). Закономерности образования

Таблица 3. Состав монацита (мас. %)

Table 3. Composition of monazite (wt. %)

Оксид Oxide	1	2	3	4	5
La_2O_3	15.23	17.36	14.71	16.98	14.59
Ce_2O_3	30.41	31.53	30.90	31.77	29.47
Pr_2O_3	4.30	3.87	4.72	4.47	3.17
Nd_2O_3	14.03	12.88	16.22	14.97	13.19
Sm_2O_3	1.90	1.63	1.97	1.75	2.11
Gd_2O_3	0.85	0.0	0.0	0.0	1.10
ThO_2	0.35	0.33	0.0	0.0	1.03
Y_2O_3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.19
CaO	0.97	0.91	0.46	0.48	0.73
SrO	0.59	0.36	0.0	0.0	1.13
P_2O_5	27.84	28.27	28.68	29.72	29.06
As_2O_5	1.83	1.55	0.0	0.0	0.0
SO_3	1.69	1.3	0.69	0.0	0.99
Σ	99.99	99.99	98.35	100.14	97.76

Коэффициенты в формуле ($O = 4$)
Coefficients in formula ($O = 4$)

La	0.22	0.25	0.22	0.25	0.21
Ce	0.43	0.45	0.45	0.46	0.43
Pr	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05
Nd	0.19	0.18	0.23	0.21	0.19
Sm	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03
Gd	0.01	0.0	0.0	0.0	0.01
Th	0.01	0.01	0.0	0.0	0.02
Y	0.0	0.0	0.0	0.0	0.03
Ca	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03
Sr	0.01	0.01	0.0	0.0	0.03
P	0.92	0.93	0.97	0.99	0.97
As	0.04	0.03	0.0	0.0	0.0
S	0.05	0.04	0.02	0.0	0.03

Примечания: ан. 1, 2 — рис. 3, б, ан. 3, 4 — рис. 5, б.
Notes: an. 1, 2 — Fig. 3, b, an. 3, 4 — Fig. 5, b.

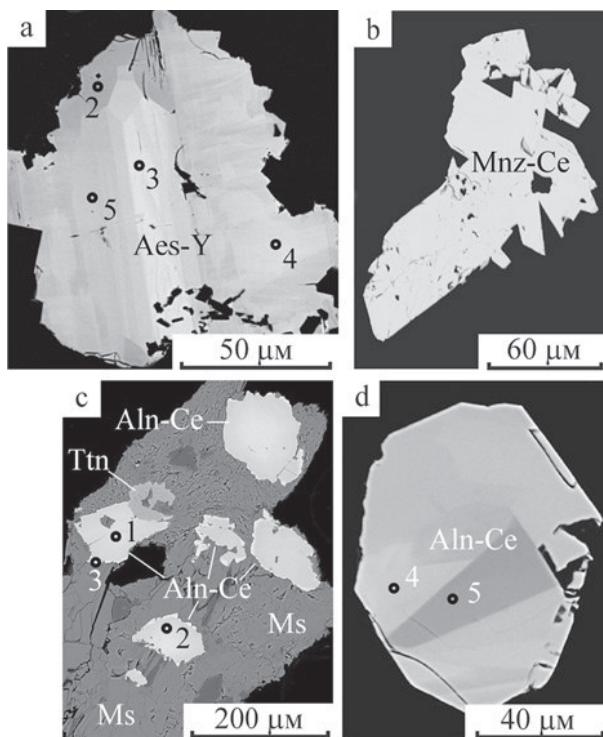


Рис. 5. Минералы REE, ассоциирующие с минералами группы кричтонита:

а — эшинит-(Y) неоднородного строения, б — сросток кристаллов монацита-(Ce), с — алланит-(Ce) в мусковитовой массе, д — алланит-(Ce) неоднородного строения. Обозначены точки анализов, цифры соответствуют номеру анализа в табл. 2 (рис. 5, а) и табл. 4 (рис. 5, с—д). Изображения в отраженных электронах. Полированный шлиф 21_65-67. Aes-Y — эшинит-(Y), Mnz-Ce — монацит-(Ce), Aln-Ce — алланит-(Ce), Ttn — титанит, Ms — мусковит

Fig. 5. REE minerals associated with crichtonite group minerals:

а — aeschynite-(Y) of heterogeneous structure, б — intergrowth of monazite-(Ce) crystals, с — allanite-(Ce) in muscovite mass, д — allanite-(Ce) of heterogeneous structure. Analysis points are indicated, numbers correspond to the analysis number in Table 2 (Fig. 5, a) and Table 4 (Fig. 5, c—d). BSE images. Polished section 21_65-67. Aes-Y — aeschynite-(Y), Mnz-Ce — monacite-(Ce), Aln-Ce — allanite-(Ce), Ttn — titanite, Ms — muscovite

Таблица 4. Состав алланита (мас. %)
Table 4. Composition of allanite (wt. %)

Оксид Oxide	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	33.21	33.21	33.26	31.86	32.84	30.69
Al ₂ O ₃	18.92	18.71	16.59	15.80	18.23	14.57
Fe ₂ O ₃	7.01	10.06	9.81	10.19	9.35	7.18
FeO	5.95	4.19	7.41	6.13	4.55	9.49
MnO	1.27	1.08	1.90	1.56	1.31	0.95
CaO	14.96	16.41	13.41	13.72	15.81	10.97
La ₂ O ₃	5.77	4.46	4.38	5.05	3.49	5.65
Ce ₂ O ₃	7.95	5.82	9.15	8.55	6.29	13.31
Nd ₂ O ₃	3.15	3.02	3.66	3.83	3.06	2.40
Σ	98.19	96.96	99.57	96.69	94.93	95.21

Коэффициенты в формуле (8 катионов)
 Coefficients in formula (8 cations)

Si	2.99	2.96	3.00	2.98	2.99	3.01
Al	2.00	1.97	1.76	1.74	1.95	1.69
Fe ³⁺	0.47	0.67	0.67	0.72	0.64	0.53
Fe ²⁺	0.45	0.31	0.56	0.48	0.35	0.78
Mn	0.10	0.08	0.14	0.12	0.10	0.08
Ca	1.44	1.57	1.30	1.37	1.54	1.15
La	0.19	0.15	0.15	0.17	0.12	0.20
Ce	0.26	0.19	0.30	0.29	0.21	0.48
Nd	0.10	0.10	0.12	0.13	0.10	0.08
Σ REE	0.55	0.44	0.57	0.59	0.43	0.76

Примечания: Ан. 1–5 соответствуют точкам анализа на рис. 5, с, д. Ан. 6 – алланит в апобазитовых гематит-серicitовых породах, обр. 7222.

Notes: An. 1–5 correspond to the analysis points in Fig. 5, c, d. An. 6 – allanite in hematite-sericite apobasite rocks, sample 7222.

минералов группы кричтонита в риолитах не столь очевидны, их формирование целесообразно рассмотреть в контексте эволюции оксидных минералов в риолитах. Основными первичными оксидными минералами риолитов являлись ильменит и Ti-содержащий магнетит, которые в значительной степени или полностью были замещены другими минералами.

Ильменит встречается в основной массе риолитов в виде зерен таблитчатой формы размером 0.1–0.5 мм, в срастании с ним отмечаются кристаллы циркона. Зерна ильменита всегда в той или иной степени замещены агрегатами рутила, гематита и титанита (рис. 6, а). Нередко реликты ильменита присутствуют в центральной части сфероидальных образований титанитового состава (рис. 6, б).

Магнетита в метариолитах в настоящее время практически нет, о его былом наличии свидетельствуют субграфические срастания гематита и минералов титана, интерпретируемые как псевдоморфозы по магнетиту, содержащему закономерно ориентированные пластиинки ильменита. В таких пластиинках, сложенных рутилом или титанитом агрегатного строения, отмечаются реликты ильменита (рис. 6, с). Кроме того, Ti-содержащий магнетит обнаружен в виде включений в цирконе, где сохранился благодаря изоляции от внешней среды. Магнетит (рис. 7, а) содержит 20 мас. % TiO₂ и, что примечательно, около 1 мас. % ZnO. При большом увеличении в магнетите видна решетка распада твердого раствора, тонкие пластиинки представлены ильменитом или ульвошпинелью. В процесс замещения магнетита в основной массе риолитов иногда вовлекаются REE. Магнетит замещается гематитом, а ильменитовые пластиинки – Nb-содержащим рутилом и монацитом.

Особый интерес представляет характер развития эшинита-(Y), сложного оксида Y-Ti-Nb-состава, который, как показано выше, ассоциирует с минералами группы кричтонита (рис. 2). Эшинит-(Y) присутствует

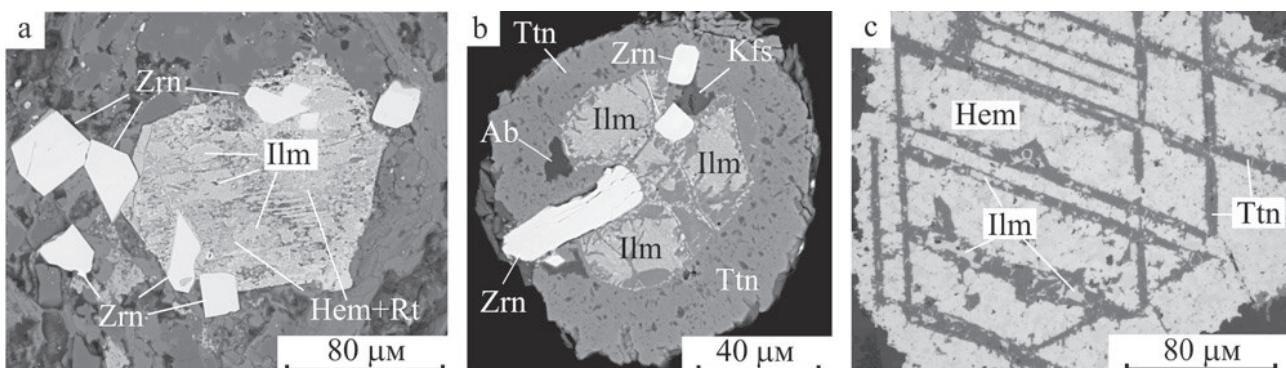


Рис. 6. Преобразования первичных Ti-Fe-оксидных минералов в риолитах:

а — ильменит замещается агрегатом рутила и гематита; б — реликты ильменита в сфероиде титанита; в — титанит-гематитовая псевдоморфоза после магнетита с решеткой ильменита, от которого сохранились небольшие реликты среди титанита. Изображения в отраженных электронах (а, б) и отраженном свете (в). Полированные шлифы K185158 (а), 34_50-62 (б), 710201 (в). Ilm — ильменит, Hem — гематит, Rt — рутил, Ttn — титанит, Zrn — циркон, Ab — альбит, Kfs — калиевый полевой шпат

Fig. 6. Transformations of primary Ti-Fe oxide minerals in rhyolites:

а — ilmenite is replaced by an aggregate of rutile and hematite; б — ilmenite relics in a titanite spheroid; в — titanite-hematite pseudomorphosis after magnetite with an ilmenite lattice, of which small relics are preserved among titanite. BSE (a, b) and reflected light (c) images. Polished sections K185158 (a), 34_50-62 (b), 710201 (c). Ilm — ilmenite, Hem — hematite, Rt — rutile, Ttn — titanite, Zrn — zircon, Ab — albite, Kfs — potassium feldspar



ет в кварц-полевошпатовой матрице метариолита, развивается в рутил-гематит-титанитовых агрегатах по первичным оксидам железа и титана. Минерал характеризуется высоким содержанием урана (9.0 мас. % UO_2) и отсутствием Th (рис. 7, а; табл. 2, ан. 6). Отмечается совместное замещение первичного титанового минерала алланитом и эшинитом-(Y). Y-Ti-Nb-оксид в этом случае имеет относительно низкое содержанием Y_2O_3 (11.3 мас. %) и высокое содержание легких REE (табл. 2, ан. 7). Алланит, заменивший первичный титановый минерал, переполнен мельчайшими включениями рутила, поэтому в анализе фиксируется около 10 мас. % TiO_2 , в других зернах алланита титан не обнаруживается (рис. 7, б). Эшинит-(Y) в виде компактных выделений развивается в серицитолитах в зоне разлома (рис. 7, с; табл. 2, ан. 8, 9), присутствует в струйчатых обособлениях серицита в метариолитах (табл. 2, ан. 10, 11). Присутствие эшинита-(Y) отмечено вблизи извилистого (видимо, деформированного) прожилка фуксита с золотом. Эшинит-(Y) (табл. 2, ан. 12) находится в кальците, ассоциирует с апатитом и кайсикхитом-(Y). Изредка отмечаются микропрожилки эшинита-(Y) в цирконе (рис. 7, д, мас. %): Y_2O_3 – 16.5, Nb_2O_5 – 6.8, TiO_2 – 43.0, ThO_2 – 3.1. Во всех случаях эшинит-(Y) не является первичным оксидным минералом риолитов, его образование связано с метаморфическими преобразованиями пород.

На удалении от месторождения эшинит-(Y) присутствует в риолитах этого же магматического комплекса, его образование связывается с постмагматической стадией преобразования риолитов (Гракова, Попвасев, 2024). Кроме того, эшинит-(Y) обнаружен в кислых разновидностях пород шатакского комплекса на Южном Урале. Основной этап редкоземельного минералообразования связывается с динамотермальным метаморфизмом пород (Ковалев и др., 2023).

Возвращаясь к минералам группы кричтонита, следует отметить, что их образование вполне отвечает общей картине метаморфических преобразований оксидных минералов в риолитах. Набор ассоциирую-

щих минералов (мусковит, гематит, рутил, циркон, эшинит-(Y), монацит-(Ce), алланит-(Ce) и характер срастаний (рис. 2, 3) свидетельствуют, что минералы группы кричтонита по способу образования являются метаморфогенными. Необходимо отметить, что в ряде случаев минералы группы кричтонита отчетливо ксеноморфны по отношению к мусковиту и монациту-(Ce), кроме того, в отличие от эшинита-(Y), они не развиваются по первичным Ti-Fe-оксидам. Обращает на себя внимание значительное сходство в условиях локализации альмейдаита на месторождении Чудное и на месте его открытия в преобразованных вулканитах кислого состава в Бразилии.

Минералы группы кричтонита на месторождении Чудное концентрируют в своем составе Pb и Zn. В первичном магнетите, заключенном в цирконе, обнаружено около 1 мас. % ZnO, но в основном Pb и Zn, видимо, были рассеяны в матрице породы. Следует отметить, что образование Pb-Zn-содержащих оксидных минералов возможно в среде с низкой активностью сульфид-иона, в противном случае более вероятно образование галенита и сфалерита. Некоторое количество серы в минералообразующем флюиде присутствовало, но не в сульфидной, а сульфатной форме, фиксирующейся в монаците (табл. 3).

Несколько иначе при метаморфическом преобразовании риолитов происходит миграция Nb. В первичных оксидных минералах Nb концентрируется в ильмените (до 1 мас. % Nb_2O_5), в замещающих его минералах содержание Nb_2O_5 бывает выше: в титаните – до 2.7 мас. %, в рутиле – до 2.5, максимально – до 7.9 мас. %. Такое перераспределение Nb при метаморфизме в некоторых случаях (при наличии Y) приводит к образованию эшинита-(Y).

Золотофукситовые прожилки подвергались метаморфическим преобразованиям совместно с вмещающими их риолитами. В прожилках проявлены процессы деформации и перекристаллизации фуксита, специфическим метаморфическим минералом в них является цинкохромит.

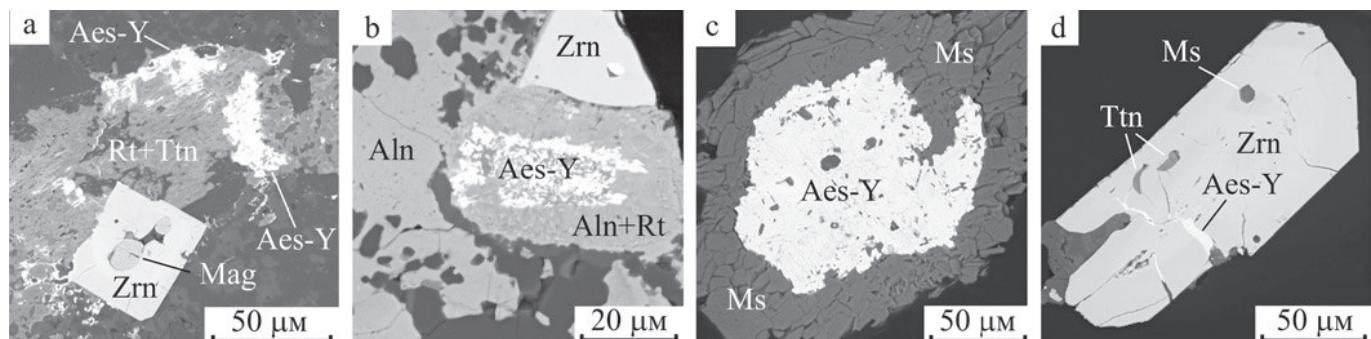


Рис. 7. Эшинит-(Y) в метариолитах:

а — эшинит-(Y) в рутил-титанитовом агрегате, в цирконе реликтовое включение Ti-содержащего магнетита; б — эшинит-(Y) в алланите, содержащем мельчайшие реликтовые частицы рутила; в — эшинит-(Y) в мусковите; д — прожилок эшинита-(Y) в цирконе. Изображения в отраженных электронах. Полированные шлифы K-185158 (а), 710201 (б), 33_135-141 (в), 31_222-227 (д). Aes-Y — эшинит-(Y), Rt — рутил, Ttn — титанит, Zrn — циркон, Aln — алланит, Ms — мусковит

Fig. 7. Aeschynite-(Y) in metarhyolites:

а — aeschynite-(Y) in rutile-titanite aggregate, relic inclusion of Ti-bearing magnetite in zircon; б — aeschynite-(Y) in allanite containing tiny relict particles of rutile; в — aeschynite-(Y) in muscovite; д — aeschynite-(Y) veinlet in zircon. BSE images. Polished sections K-185158 (а), 710201 (б), 33_135-141 (в), 31_222-227 (д). Aes-Y — aeschynite-(Y), Rt — rutile, Ttn — titanite, Zrn — zircon, Aln — allanite, Ms — muscovite



Заключение

На Au-Pd-месторождении Чудное выявлены сложные Fe-Ti-оксиды группы кричтонита, минеральный вид которых определяется соотношениями между Pb и Sr, а также между Zn, Mn и Y. В метариолитах присутствуют альмейдайт, кричтонит, сенайт и минералы промежуточного состава. К альмейдайту отнесены разности с преобладанием Pb над Sr и значительным содержанием Zn, к кричтониту — с преобладанием Sr над Pb и невысоким содержанием Zn, к сенайту — с преобладанием Pb над Sr и значительным содержанием Mn. В апобазитовых гематит-серицитовых породах на контакте с метариолитами обнаружен грамаччиолиит-(Y), минерал с доминированием Pb среди крупных катионов и преобладанием Y над Mn.

Минералы группы кричтонита выявлены в контурах рудных зон с прожилковой золотофускитовой минерализацией, но локализованы они не в рудных прожилках, а в породной матрице. Образование минералов группы кричтонита соответствует общей картине метаморфических преобразований оксидных минералов в риолитах и контактирующих с ними породах основного состава.

Исследование проведено в рамках темы «Фундаментальные проблемы минералогии и минералообразования, минералы как индикаторы петро- и рудогенеза, минералогия рудных районов и месторождений Тимано-Североуральского региона и арктических территорий» (ГР № 122040600009-2).

Литература / References

- Андреичев В. Л. Геохронология гранитоидного магматизма Приполярного Урала // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 11. С. 7–12.
- Andreichev V. L. Geochronology of granitoid magmatism of Subpolar Urals. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2010, No.11, pp. 7–12. (in Russian)
- Барков А. Ю., Никифоров А. А. Редкоземельные, редкие и другие рудогенные элементы в минералах групп кричтонита и перовскита из фенитизированного мегаксенолита Хибинского комплекса, Кольский п-ов // Вестник ВГУ. Серия: геология. 2015. № 3. С. 50–58.
- Barkov A. Y., Nikiforov A. A. Rare earths, rare elements and other ore-forming components in members of the crichtonite and perovskite groups from a fenitized megaxenolith, Khibina complex, Cola peninsula. Vestnik of Voronezh State Univ., Ser. Geol. 2015, No. 3, pp. 50–58. (in Russian)
- Гракова О. В., Попвасев К. С. Редкоземельные минералы в докембрийских породах северной части Ляпинского антиклиниория (Приполярный Урал) // Литосфера. 2024. № 4. С. 661–674. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674>
- Grakova O. V., Popvasev K. S. Rare-earth minerals in pre-Cambrian rocks of the Lyapinskii anticlinorium (Subpolar Urals). Lithosphere (Russia), 2024, No. 4, pp. 661–674. (in Russian)
- Карпов С. М., Волошин А. В., Компачченко А. А., Савченко Е. Э., Базай А. В. Минералы группы кричтонита в колчеданных рудах и рудных метасоматитах протерозойских структур Кольского региона // Записки РМО. 2016. № 5. С. 39–56.
- Karpov S. M., Voloshin A. V., Kompanchenko A. A., Savchenko Ye. E., Bazay A. V. The crichtonite group minerals in the sulfide ores and ore-metasomatic rocks of Proterozoic structures of the Kola Region. Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.), 2016, V. 145, No. 5, pp. 39–56. (in Russian)
- Карташов П. М., Тронева Н. В., Мокхов А. В., Коваленко В. И., Царева Г. М. О дефектном цинксодержащем сенайте из редкometалльных щелочных гранитов Халдзан-Бурэгтэга (Монгольский Алтай) // Докл. АН. 1993. Т. 332. № 6. С. 755–758.
- Kartashov P. M., Troneva N. V., Mokhov A. V., Kovalenko V. I., Tsaryeva G. M. On defect zinc-bearing senaite from rare-metal alkaline granites at Khaldzan-Buregtee (Mongolian Altai). Doklady Earth Sciences, 1993, V. 332, No. 6, pp. 755–758. (in Russian)
- Козлов А. В., Корзников В. Д., Смоленский В. В., Кузнецов С. К., Савичев А. А., Иванов А. С., Васильев Е. А. Проблемы оценки возраста Au-Pd-минерализации месторождения Чудное (Приполярный Урал) // Записки РМО. 2024. Т. 153. № 3. С. 42–63. DOI: 10.31857/S0869605524030036
- Kozlov A.V., Korznikov V.D., Smolensky V.V., Kuznetsov S. K., Savichev A. A., Ivanov A. S., Vasiliev E. A. Problems of Dating the Au-Pd Mineralization of the Chudnoye Deposit (the Subpolar Urals). Zapiski RMO, 2024, V. 153, No. 3, pp. 42–63. (in Russian)
- Ковалев С. Г., Ковалев С. С., Шарипова А. А. Первые данные о редкоземельной минерализации в кислых разновидностях пород шатакского комплекса (Южный Урал) // Литосфера. 2023. № 5. С. 910–929. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>
- Kovalev S. G., Kovalev S. S., Sharipova A. A. First data on rare earth mineralization in acid rock varieties of the Shatak complex (Southern Urals). Lithosphere (Russia). 2023, No. 5, pp. 910–929. (in Russian)
- Козырева И. В., Юдович Я. Э., Швецова И. В., Кетрис М. П., Ефанова Л. И. Глиноземистые и железистые породы Приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 101 с.
- Kozyreva I. V., Yudovich Ya. E., Shvetsova I. V., Ketris M. P., Efanova L. I. The aluminous and ferriferous rocks of the Near-Polar Urals. Yekaterinburg, 2003, 101 p. (in Russian)
- Козырева И. В., Швецова И. В. Грамаччиолиит-(Y): первая находка в России // Докл. АН. 2010. Т. 433. № 5. С. 675–677.
- Kozyreva I. V., Shvetsova I. V. Gramacciolite-(Y): The First find in Russia. Doklady Earth Sciences, 2010, V. 433, p. 2, pp. 1074–1076.
- Кузнецов С. К., Андреичев В. Л. Возраст золото-фускитовой минерализации в риолитах хребта Малдынырд // Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов: Материалы Всерос. конф. Сыктывкар, 1998. С. 18–19.
- Kuznetsov S. K., Andreichev V. L. The age of gold-fuchsite mineralization in the rhyolites of the Maldynyr ridge. Gold, platinum and diamonds of the Komi Republic and adjacent regions. Proceedings of the All-Russian Conf. Syktyvkar, 1998, pp. 18–19. (in Russian)
- Моралев Г. В., Борисов А. В., Суренков С. В., Тарбаев М. Б., Пономарчук В. А. Первые $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -датировки слюд Au-Pd-РЭ-проявления Чудное (Приполярный Урал) // Докл. АН. 2005а. Т. 400. № 2. С. 243–246.



- Moralev G. V., Borisov A. V., Surenkov S. V., Tarbaev M. B., Ponomarchuk V. A. The first $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -dating of micas from the Chudnoe Au-Pd-REE occurrence, Near-Polar Urals. Doklady Earth Sciences, 2005a, V. 400, No. 2, pp. 109–112
- Моралев Г. В., Борисов А. В., Суренков С. В., Тарбаев М. Б., Пономарчук В. А. Первое $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -датирование мицелей из месторождения Чудное Au-Pd-REE, Северо-Полярные Уралы. Доклады Земесловия, 2005а, № 400, ч. 2, с. 109–112.*
- Moralev G. V., Borisov A. V., Surenkov S. V., Nagaeva S. P., Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Onishchenko S. A., Efanova L. I., Soboleva A. A. Распределение и формы нахождения редкоземельных элементов на Au-Pd-REE-рудопроявлениях Чудное и Нестеровское (хребет Малдынырд, Приполярный Урал) // Геохимия. 2005б, № 11. С. 1175–1195.
- Moralev G. V., Borisov A. V., Surenkov S. V., Nagaeva S. P., Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Onishchenko S. A., Efanova L. I., Soboleva A. A. Distribution and modes of occurrence of REE at the Chudnoe and Nesterovskoe occurrences of Au-Pd-REE ore mineralization in the Maldynyr Range, Nether-Polar Urals. Geochem. Int. 2005б, V. 43, No. 11, pp. 1078–1097.
- Ozerov B. С. Метаморфизованные россыпи золота Приполярного Урала // Руды и металлы. 1996. № 4. С. 28–37.
- Ozerov V. S. Metamorphosed gold placers of the Subpolar Urals. Rudy i Metally, 1996, No. 4, pp. 28–37. (in Russian)
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Палладий-золотосульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 6, С. 20–27. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-6-20-27
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Palladium-gold-sulphide mineralization in andesites at Chudnoe deposit (Subpolar Urals). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2019, No. 6, pp. 20–27. (in Russian)
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Самородное золото Au-Pd-месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия) // Геология и геофизика. 2023. № 2. С. 233–254. <https://doi.org/10.15372/GiG2022122>
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Native Gold of the Chudnoe Gold-Palladium Deposit (Subpolar Urals, Russia). Russian Geology and Geophysics, 2023, V. 64, No. 2, pp. 192–209. DOI: 10.2113/RGG20214452
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Минералы палладия и платины в рудах Au-Pd-месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия) // Литосфера. 2024. № 3. С. 526–546. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-526-546>
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Palladium and platinum minerals in Au-Pd ores of the Chudnoe deposit (Subpolar Urals, Russia). Lithosphere (Russia), 2024, No. 3, pp. 526–546. (in Russian)
- Onishchenko S. A., Sokolova N. V., Kuznetsov S. K., Isaenko S. I., Tropnikov E. M. Стадийность формирования кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. 2024. № 1. С. 4–15. DOI: 10.19110/geov.2024.1.1
- Onishchenko S. A., Sokolova N. V., Kuznetsov S. K., Isaenko S. I., Tropnikov E. M. Stages of formation of quartz-albite-allanite-fuchsite veins at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals). Vestnik of Geosciences, 2024, No. 1, pp. 4–15. (in Russian).
- Rasstsvetaeva R. K., Aksenenko S. M., Chukanov N. V., Menezes Filho L. A. D. (L. A. D. Menezes) Кристаллическая структура альмейдита — нового члена группы кричтонита // Докл. АН. 2014. Т. 455. № 4. С. 416–420.
- Rasstsvetaeva R. K., Aksenenko S. M., Chukanov N. V., Menezes Filho L. A. D. Crystal structure of almeidaite, a new mineral of the crichtonite group. Doklady Chemistry, 2014, No. 455(1-2), pp. 53–57.
- Rasstsvetaeva R. K. Кричтонит и его семейство: история открытия двух новых минералов // Природа. 2020. № 8. С. 39–47. DOI: 10.7868/S0032874X20080049
- Rasstsvetaeva R. K. Crichtonite and its family: the story of the discovery of two new minerals. Priroda, 2020, No. 8, pp. 39–47. (in Russian)
- Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Moralev G. V., Soboleva A. A., Laputina I. P. Новый золото-палладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала (Россия) // Геология рудн. месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 15–30.
- Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Moralev G. V., Soboleva A. A., Laputina I. P. A new gold-palladium type of mineralization in the Kozhim region of the Circumpolar Urals (Russia). Geol. Ore Depos., 1996, V. 38, No. 1, pp. 11–25.
- Черников А. А. Сложные оксиды урана в урановых рудах // Новые данные о минералах. 2012. Вып. 47. С. 71–83.
- Chernikov A. A. Complex uranium oxides in uranium ores. New Data on Minerals, 2012, V. 47, pp. 71–83. (in Russian)
- Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Giere R., Heuss-Assbischler S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero M. Recommended nomenclature of epidote group minerals. Eur. J. Mineral. 2006. V. 18. P. 551–567. DOI: 10.1127/0935-1221/2006/0018-0551
- Barkov A. Y. Sr-Na-REE titanates of the crichtonite group from a fenitized megaxenolith, Khibina alkaline complex, Kola Peninsula, Russia: first occurrence and implications. Eur. J. Mineral. 2006. V. 18. P. 493–502. DOI: 10.1127/0935-1221/2006/0018-0493
- Foord E. E., Sharp W. N., Adams J. W. Zinc and Y-group-bearing senaite from St Peters Dome, and new data on senaite from Dattas, Minas Gerais, Brazil. Miner. Mag., 1984. V. 48. P. 97–106.
- Menezes Filho L. A. D., Chukanov N. V., Rasstsvetaeva R. K., Aksenenko S. M., Pekov I. V., Chaves M. L. S. C., Richards R. P., Atencio D., Brandao P. R. G., Scholz R., Krambrock K., Moreira R. L., Guimarães F. S., Romano A. W., Persiano A. C., de Oliveira L. C. A., Ardisson J. D. Almeidaite, $\text{PbZn}_2(\text{Mn},\text{Y})(\text{Ti},\text{Fe}^{3+})_{18}\text{O}_{37}(\text{OH},\text{O})$, a new crichtonite-group mineral, from Novo Horizonte, Bahia, Brazil. Miner. Mag. 2015. V. 79. No. 2. P. 269–283.
- Orlandi P., Pasero M., Rotiroli N., Olmi F., Demartin F., Moelo Y. Gramaccioliite-(Y), a new mineral of the crichtonite group from Stura Valley, Piedmont, Italy. Europ. J. Mineral. 2004. V. 16. P. 171–175.
- Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. Native Gold in the Chudnoe Au-Pd-REE Deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, minerals in intergrowth and genesis. Minerals. 2021. V. 11. 451. <https://doi.org/10.3390/min11050451>
- Theye T., Hatert F., Ockenga E., Bertoldi C., Latne C. Gramaccioliite-(Y): paragenesis chemistry, and structure in a new occurrence, Samos Island, Greece. Eur. J. Mineral. 2010. V. 22. P. 443–452. DOI: 10.1127/0935-1221/2010/0022-2020

Received / Поступила в редакцию 24.06.2025