



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 553.2:550.836(234.851)

DOI: 10.19110/geov.2025.6.1

Условия образования золотого оруденения в минерализованных зонах рудопроявления Ягодное по данным хлоритовой геотермометрии (кряж Манитанырд, Полярный Урал)

Т. П. Майорова^{1,2}, Л. И. Ефанова¹¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия; gmin2004@mail.ru² СГУ им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия; mayorova@geo.komisc.ru

В золотоносной зоне рудопроявления Ягодное установлен характер метасоматических изменений вмещающих пород, химический состав хлорита и условия его образования. Минеральный состав и текстурно-структурные особенности метасоматитов позволяют отнести их к пропилитам эпидот-хлоритовой субфации. Микроскопическое описание шлифов выполнялось на оптическом микроскопе Nikon Eclipse LV 100 ND. Состав хлорита определен на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMH с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max. По химическому составу изученный хлорит соответствует клинохлору. Температура образования минерала оценена с помощью хлоритовой геотермометрии. Клинохлор (пикнохлорит), ассоциирующий с метакристаллами пирита, образовался в температурном интервале 306–235 °С. Клинохлор (пеннин) установлен только в виде единичных включений в пирите, существенно обогащен Si; температура его образования 185–157 °С. Тесная ассоциация хлорита с метакристаллами золотоносного пирита свидетельствует об их одновременном образовании в течение единого метасоматического процесса при 306–157 °С с пиком температуры 306–235 °С.

Ключевые слова: золоторудное проявление, минерализованная зона, клинохлор, хлоритовая геотермометрия, температура кристаллизации, кряж Манитанырд, Полярный Урал

Conditions of gold mineralization formation in mineralized zones of the Yagodnoye ore occurrence based on chlorite geothermometry (Manitanyrd Ridge, Polar Urals)

T. P. Mayorova^{1,2}, L. I. Efanova¹¹ Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia² P. Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

The gold-bearing zone of the Yagodnoye ore occurrence was studied to determine the nature of metasomatic alterations in the host rocks, the chemical composition of chlorite, and the conditions of its formation. Metasomatites exhibit mineralogical and textural-structural characteristics typical of propylites from the epidote-chlorite subfacies. Petrographic analysis was conducted by Nikon Eclipse LV 100 ND optical microscope, while chlorite composition was determined via Tescan Vega 3 LMH scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments X-Max energy-dispersive spectrometer. The chemical composition of the studied chlorite corresponds to clinochlore. The temperature of mineral formation was estimated by a chlorite geothermometer. Clinochlore (pynochlorite), associated with gold-bearing pyrite metacrystals, formed at 306–235 °C. Clinochlore (pennine) is found only in the form of single inclusions in pyrite, is significantly enriched in Si, and its formation temperature is 185–157 °C. The paragenetic association of chlorite with gold-bearing pyrite metacrystals suggests that both minerals were co-precipitated simultaneously during a single metasomatic process at 306–157 °C with a peak temperature of 306–235 °C.

Keywords: gold occurrences, mineralized zone, clinochlore, chlorite geothermometry, crystallization temperature, Manitanyrd ridge, Polar Urals

Введение

Минералы группы хлорита ($Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn, Al$)₁₂ [(Si, Al)₈O₂₀](OH)₁₆ широко распространены на месторождениях разных типов и часто тесно связаны с процессами рудообразования (Шафигуллина и др., 2020; Zang, Fyfe, 1995; Wang et al., 2022). Хлориты характеризуются широкими вариациями кристаллохимиче-

ского и химического состава, которые зависят от состава вмещающих пород и физико-химических условий образования, коррелируя с температурой, fugitivностью серы и кислорода (Martinez-Serrano, Dubois, 1998; Hydrous phyllosilicates..., 1991). В связи с этим хлорит широко используется как эффективный геотермометр для расчета температур образования ме-

Для цитирования: Майорова Т. П., Ефанова Л. И. Условия образования золотого оруденения в минерализованных зонах рудопроявления Ягодное по данным хлоритовой геотермометрии (кряж Манитанырд, Полярный Урал) // Вестник геонаук. 2025. 6(366). С. 3–13. DOI: 10.19110/geov.2025.6.1

For citation: Mayorova T. P., Efanova L. I. Conditions of gold mineralization formation in mineralized zone of the Yagodnoye ore occurrence based on chlorite geothermometry (Manitanyrd Ridge, Polar Urals). Vestnik of Geosciences, 2025, 6(366), pp. 3–13, doi: 10.19110/geov.2025.6.1

таморфических пород и гидротермальных преобразований, сопровождающих процессы рудообразования (Inoue, Kurokawa, Hatta, 2010; Cathelineau, Neiva, 1985; Cathelineau, 1988; Kranidiotis, MacLean, 1987; Jowett, 1991).

С целью выяснения условий формирования золотого оруденения, связанного с метасоматическими изменениями вмещающих пород в минерализованных зонах рудопроявления Ягодное, нами изучен петрографический состав вмещающих пород, химический состав хлоритов и определена температура их кристаллизации.

Геологическая ситуация

В центральной части кряжа Манитанырд в пределах линейно вытянутой тектонической структуры ССВ-простираения, названной Нияюской рудной зоной (Ефанова, 2020), расположены золоторудные проявления Нияхойское-1, Нияхойское-2, Ягодное, Верхнелияюское-1, Верхнелекелецкое и мелкое (по запасам) месторождение Верхнелияюское-2, а также многочисленные пункты минерализации (рис. 1).

Ранее основное внимание уделялось изучению золотомышьяково-сульфидных проявлений кварцево-жильного типа (месторождение Верхнелияюское-2,

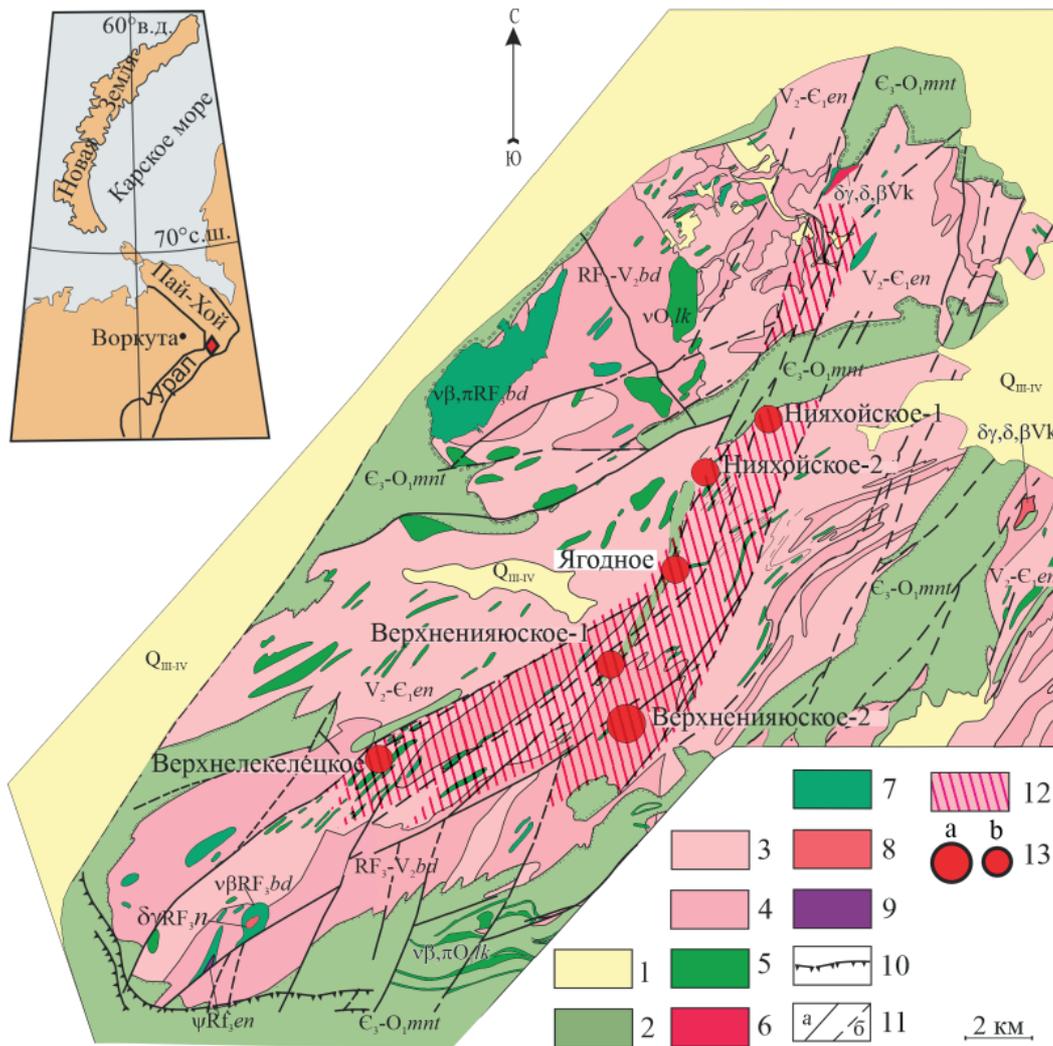


Рис. 1. Геологическое строение и золоторудные проявления Манитанырдского района (Государственная..., 2013 с дополнениями): 1 – четвертичные отложения; 2 – манитанырдская серия нерасчлененная (верхний кембрий – нижний ордовик); 3 – энганепэйская* свита (верхний венд – нижний кембрий); 4 – бедамельская серия нерасчлененная (верхний рифей – венд). Интрузивные образования: 5 – леквозжский комплекс: оливиновые габбро и долериты, пикродолериты; 6 – кзызгейский комплекс: диориты, гранодиориты, плагиограниты; 7 – нижнебедамельский комплекс: габбро, габбро-долериты; 8 – нияюский комплекс: диориты, гранодиориты, плагиограниты; 9 – энганепэйский комплекс: серпентиниты апоперидотитовые, апиноксенитовые; 10 – тектонические покровы; 11 – разрывные нарушения: а – достоверные, b – предполагаемые; 12 – Нияюская рудная зона; 13 – золоторудные месторождения (а) и проявления (b)

Fig. 1. Geological structure and gold ore occurrences in the Manitanyrd region (State Geological Map..., 2013 with additions): 1 – Quaternary deposits; 2 – undivided Manitanyrd series (Upper Cambrian – Lower Ordovician); 3 – Enganepe suite (Upper Vendian – Lower Cambrian); 4 – undivided Bedamel series (Upper Riphean – Vendian). Intrusions: 5 – Lekvozhskey complex: olivine gabbro and dolerites, picrodolerites; 6 – Kyzyeiskii complex: diorites, granodiorites, plagiogranites; 7 – Lower Bedamel complex: gabbro, gabbro-dolerites; 8 – Niyayu complex: diorites, granodiorites, plagiogranites; 9 – Enganepe complex: serpentinites apoperidotite, apopyroxenite; 10 – overthrust nappes; 11 – faults: a – proved, b – probable; 12 – Niyayu ore zone; 13 – gold ore deposits (a) and occurrences (b)

* На геологической карте листа Q-41-V, VI масштаба 1 : 200 000 эта свита названа «энганэпэйская»



проявления Нияхойское-2, Верхнелекелецкое) (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001; Кузнецов и др., 2011; Майорова, Ефанова, 2019; Майорова и др., 2022). Однако в последние годы в Манитаньрдском районе выявлены зоны прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации во вмещающих породах (тип минерализованных зон), представляющие особый интерес для дальнейшего исследования, поскольку оценка их золотоносности позволяет увеличить ресурсный потенциал территории на коренное золото (Ефанова и др., 2020). Золоторудные объекты локализируются в позднерифейско-раннекембрийских вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах бедамельской серии и енганепэйской свиты, которые с угловым и стратиграфическим несогласием перекрыты более поздними образованиями палеозойского возраста. На рудопроявлениях кварцево-жильного типа околорудные изменения наиболее ярко проявлены в вулканитах основного состава и выражены ранней пропилитизацией, сопровождающейся появлением эпидот-актинолит-кварц-альбит-хлоритовых минеральных парагенезисов (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001). Рудная минерализация этого этапа представлена кварцевыми жилами с ранним пиритом и арсенопиритом с тонкодисперсным золотом. Позднее пропилитизированные породы подверглись кварц-серицитовому и кварц-серицит-карбонатному метасоматозу березит-лиственитовой формации, который сопровождался появлением наложенной сфалерит-галенитовой ассоциации с самородным золотом (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001).

Рудопроявление Ягодное расположено в среднем течении руч. Ниявож в районе его паукообразной развилки и локализуется в вулканогенно-осадочных породах енганепэйской свиты позднего венда – раннего кембрия. Оно обнаружено при заверке комплексной литогеохимической аномалии по вторичным ореолам рассеяния со средним содержанием Au 0.019 г/т и сопутствующими As, Mo, Pb, Ag. В штучных пробах, отобранных из элювиально-делювиальных щебнисто-мелкоглыбовых отложений с суглинистым заполнителем мощностью 0.8–2.0 м, содержание золота колебалось от следовых значений до 11.1 г/т. При оценке аномалии буровыми скважинами подсечены 2 зоны пиритизированных туфопесчаников и туфоалевролитов мощностью около 10 и 30 м. В них установлены интервалы с содержанием золота, достигающим промышленных значений. На поверхности минерализованная зона прослежена на протяжении около 200 м. Визуально она выделяется буровато-рыжей окраской пород, их высокой дислоцированностью, развитием участков катклаза и милонитизации. Рудная минерализация представлена вкрапленностью окисленного пирита, содержание которого не превышает 1–2 об. %.

В минерализованной зоне поисковый интерес представляет интервал мощностью 14.2 м, в котором среднее содержание золота составляет 0.6 г/т на истинную мощность 11.5 м, при вариациях от 0.15 до 1.11 г/т (рис. 2). Минералогическим анализом протоколных проб установлено наличие невесового золота в количестве от 1 до 21 знаков. Размер золотинок — от 0.1×0.1 до 0.5×0.5 мм, они часто находятся в сростках с кварцем, а в зоне окисления — с гидроксидами железа.

Основное внимание в данной статье уделено золотоносному интервалу минерализованной зоны рудопроявления.

Материалы и методы

Во время полевых работ 2008 г. на рудопроявлении Ягодное отобраны бороздовые, точечные, задирыковые пробы (весом 5–12 кг), по которым проведен атомно-абсорбционный анализ на Au в Центральной лаборатории ЗАО «Миреко» (Сыктывкар). Последующие петрографические и минералогические исследования проводились в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Микроскопическое описание шлифов выполнялось на оптическом микроскопе Nikon Eclipse LV 100 ND. Состав минералов определялся в аншлифах на электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN (Tescan, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (аналитики Е. М. Тропников, А. С. Шуйский). Напряжение 20 кВ, ток пучка 30 нА, диаметр пучка 2 мкм, время набора спектров 60–80 сек (600 тыс. импульсов). В качестве стандартов использовались следующие эталоны: чистые металлы для Fe, Mn, Cr, Ti; оксиды для Mg, Al, Si; KBr для K; минералы — волластонит для Ca, SiO_2 для кислорода. Погрешность определения (мас. %): 0.15 — Fe, 0.1 — Mg, 0.1 — Al, 0.1 — Si, 0.05 — Mn, 0.1 — Ca; 0.04 — Cr, 0.04 — Ti.

Структурные формулы хлорита рассчитаны на основе $\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ (половина структуры — half-cell structure), а Fe рассматривается как Fe^{2+} (Zane, Weiss, 1998). Названия минералов группы хлорита приводятся в двух вариантах — по принятой в настоящее время номенклатуре (Bailey, 1980; Wiewiora, Weiss, 1990) и с указанием их специальных названий (по Hey, 1954), которые до сих пор широко используются в отечественной и зарубежной литературе. Для визуализации составов хлорита и температур его образования также использована классификационная диаграмма Si — (Fe/Fe+Mg) (Hey, 1954).

Оценка температурного режима отложения хлорита выполнена с использованием данных для эмпирического хлоритового геотермометра, основанного на количестве тетраэдрического алюминия (Al^{IV}) и мольной доле железа $X(\text{Fe})$, между которыми была установлена линейная зависимость от температуры (Cathelineau, Neiva, 1985; Cathelineau, 1988). Затем этот хлоритовый геотермометр был модифицирован с учетом поправки на повышение температуры при высоком соотношении (Fe/Fe+Mg) (Kranidiotis, MacLean, 1987; Jowett, 1991). Кроме того, А. Р. Котельниковым с соавторами (2012) проведена экспериментальная калибровка хлоритового геотермометра (Cathelineau, Neiva, 1985) при температуре 200–250 °С, $P = 0.5$ кбар и для оценки температур предложены два уравнения, применимые в интервале 150–300 °С, одно из которых также использовано в нашей работе.

Полученные данные по химическому составу хлоритов рудопроявления Ягодное показывают, что они относятся к маложелезистым разновидностям, поэтому для расчета температуры их образования мы использовали следующие геотермометры (Cathelineau, 1988; Jowett, 1991; Котельников и др., 2012). Формулы для расчета температур приведены в таблице 1.

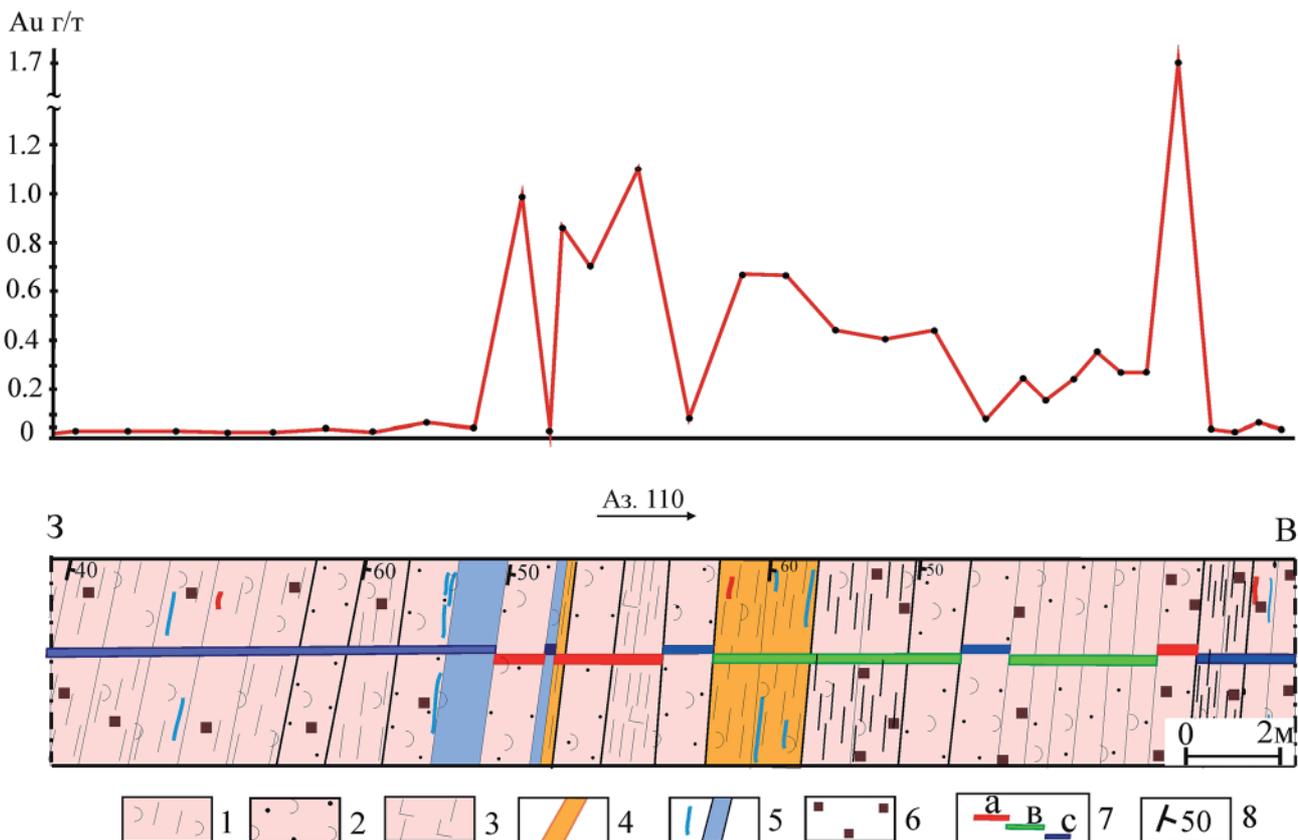


Рис. 2. Минерализованная зона рудопоявления Ягодное и распределение содержаний золота по результатам бороздочного опробования: 1–3 – катаклазированные туфоалевросланцы (1), туфопесчаники (2), ортосланцы по вулканогенным породам основного состава (3); 4 – зоны лимонитизации; 5 – кварцевые жилы и прожилки; 6 – лимонитизированный пирит; 7 – место отбора проб; цветом показано содержание Au: красным – 0.7–1.7 г/т; зеленым – 0.2–0.6 г/т; синим – 0.02–0.08 г/т; 8 – элементы залегания сланцеватости

Fig. 2. Mineralized zone of the Yagodnoye ore occurrence and distribution of gold grades based on channel sampling results: 1, 2, 3 – cataclastic tuff siltstones (1), tuff sandstones (2), orthoschists on volcanic rocks of basic composition (3); 4 – limonitization zones; 5 – quartz veins and veinlets; 6 – limonitized pyrite; 7 – sampling location; Au grade is shown in color: red – 0.7–1.7 g/t; green – 0.2–0.6 g/t; blue – 0.02–0.08 g/t; 8 – schistosity bedding elements

Таблица 1. Формулы для расчета температур образования хлоритов

Table 1. Formulas for calculating the temperatures of chlorite formation

$T_1, ^\circ\text{C} = -61.92 + 321.98 \text{ Al}^{\text{IV}}$	(Cathelineau, 1988)
$T_2, ^\circ\text{C} = 319 \text{ Al}^{\text{IV}} \text{ cor} - 69$, где $\text{Al}^{\text{IV}} \text{ cor} = \text{Al}^{\text{IV}} + 0.1(\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg}))$	(Jowett, 1991)
$T_3, ^\circ\text{C} = 39.73 + 180.64 * \text{Al}^{\text{IV}} (\pm 15)$	(Котельников и др., 2012)

Результаты

Породы минерализованной зоны рудопоявления Ягодное представлены туфоалевросланцами (70 %), среди которых присутствуют единичные (1–2 м) пролои туфопесчаников (10–30 %) и ортосланцев по вулканогенным породам основного состава (5 %, мощностью 4–5 м). Многочисленные прожилки мощностью 0.2–0.3 м, редко 0.9–1 м выполнены ожелезненным молочного-белым кавернозным кварцем с ксенолитами вмещающих пород. В зальбандах прожилков встречаются эпидот и хлорит.

Золотоносный интервал приурочен к пиритизированному актинолит-хлорит-серицит-альбитовым ортосланцам (рис. 2). Под микроскопом основная ткань породы сложена сланцеватым, неяснополосчатым, тонкозернистым фибролепидогранобластовым агрегатом,

состоящим из альбита – 60–65 %, хлорит-серицитового агрегата – 20–30 %, актинолита – 10–15 % с незначительным количеством лейкоксена, эпидота и титаниита, единичными зернами апатита. На фоне мелкозернистого матрикса встречаются участки слабо разложившейся стекловатой массы породы основного состава с агрегатным мелкозернистым пиритом (рис. 3, а).

Альбит слагает тонкозернистый агрегат с размером зерен 0.01–0.05 мм, на фоне которого выделяются длиннопризматические, лейстовидные (0.1–0.2 мм) и неяснотаблитчатые (0.3–0.7 мм) выделения.

Серицит совместно с хлоритом развит в виде неоднородного по составу агрегата параллельно ориентированных листочков размером до 0.05 мм.

Хлорит образует скопления между лейстами плагиоклаза или замещает роговую обманку, стекло эф-



фузивных и цемент вулканогенно-обломочных пород, а также выполняет прожилки.

Актинолит встречается в виде тонкоигольчатых и игольчато-волоконистых выделений бледно-зеленого цвета, слабая самостоятельные или, вместе с хлоритом и серицитом, линзовидные скопления, или равномерно рассеян в агрегате альбита.

Эпидот и *титанит* образуют линзы и пятна среди хлорита или хлорит-актинолитового агрегата. Титанит редок, размер до 0.1 мм.

Отмечается присутствие единичных призматических кристаллов апатита размером 0.4–0.6 мм.

Таким образом, основной минеральный состав ортосланцев представлен ассоциацией новообразованных минералов: (эпидот) — актинолит + (хлорит + серицит) + альбит с агрегатным мелкозернистым пиритом.

Вместе с тем на фоне мелкозернистой основной ткани породы наблюдаются участки (гнезда, линзы, полосы), сложенные средне- и крупнозернистым гранобластовым агрегатом кварц-альбит-хлоритового состава с эпидотом и крупными, хорошо ограниченными кристаллами пирита (рис. 3, с, d; 4, а, с, d). Кристаллы

пирита имеют размер от 0.1–0.3 мм до 1 см, насыщены микровключениями нерудных минералов (рис. 3, с, d; 4, а, с), их обрастает стебельчатый кварц, крупночешуйчатый хлорит, альбит, эпидот (рис. 3, а, b; 4, с, d).

Появление в тонкозернистой породе участков крупнозернистых гранобластовых агрегатов кварца, хлорита, альбита, эпидота, серицита в ассоциации с крупными кристаллами пирита свидетельствует о дальнейшем развитии метасоматического процесса. Состав метасоматитов: эпидот-альбит-хлорит-кварц + крупные метакристаллы пирита.

Рудным минералом в актинолит-хлорит-серицит-альбитовых ортосланцах минерализованной зоны является пирит. Пирит представлен двумя разновидностями: 1) распыленным в матрике породы мелкозернистым агрегатом Py-I (рис. 3, а, b), 2) мелкими (0.01–0.05 мм) до крупных (0.1–1 мм и выше) кристаллами и их сростками (Py-II), приуроченными к участкам крупнозернистых агрегатов кварц-альбит-эпидот-хлоритового состава (далее — метасоматиты) (рис. 3, с, d). Состав мелкозернистых агрегатов пирита (Py-I), распыленных в основной ткани породы, не определялся. Пирит метасоматитов (Py-II) относится к мышьякови-

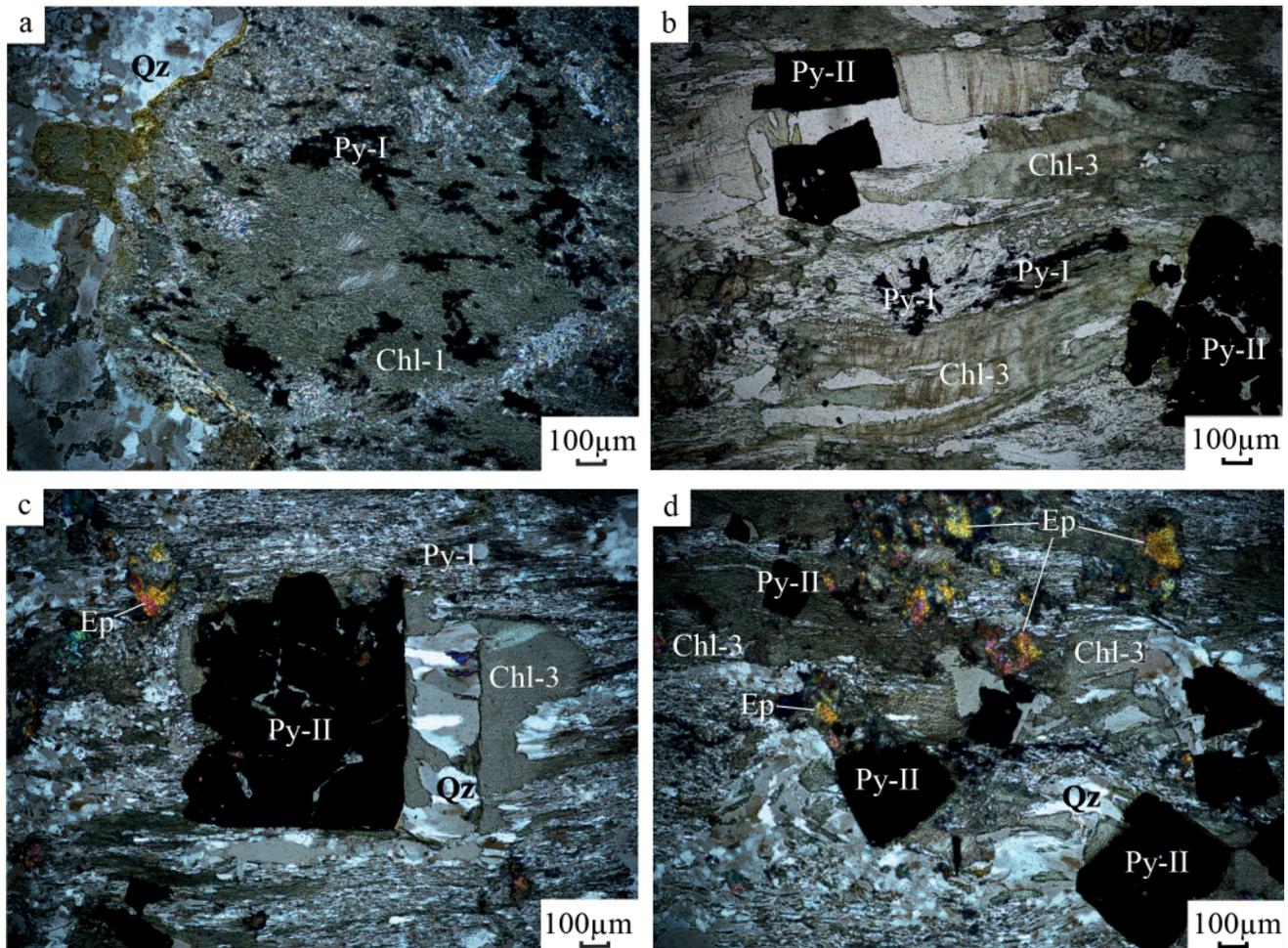


Рис. 3. Актинолит-хлорит-серицит-альбитовый ортосланец с крупнозернистым агрегатом кварц-альбит-хлоритового состава с кристаллами пирита: а — реликт протолита основного состава со скоплениями мелкозернистого пирита; б, с, d — участки крупнозернистого строения с кристаллами пирита (шлиф 16108). а, с, d — фото с анализатором, николи полускрещены; b — режим параллельных николей. Аббревиатуры минералов: Py — пирит, Chl — хлорит, Qz — кварц, Ep — эпидот

Fig. 3. Actinolite-chlorite-sericite-albite orthoschist with a coarse-grained aggregate of quartz-albite-chlorite composition with pyrite crystals: a — relict of protolith of basic composition with accumulations of fine-grained pyrite; b, c, d — areas of coarse-grained structure with pyrite crystals (thin section 16108). a, c, d — photo with analyzer, nicols are half-crossed; b — parallel nicols mode. Mineral abbreviations: Py — pyrite, Chl — chlorite, Qz — quartz, Ep — epidote

стой разновидности — As от 0.15 до 1.28 мас. %, по данным ICP-MS-анализа содержание Au в нем составляет 13.8 г/т, Ag — 2.16 г/т (Ефанова, Ковальчук, Майорова, 2024). В кристаллах пирита обнаружены субмикронные включения золота (размером около 1.5 мкм). Во вмещающих породах, разрушенных до рыхлой глинисто-слюдистой массы, установлены частицы самородного золота рудного облика размером 0.1–0.25 мм (Маюгова et al., 2023).

В минерализованной зоне по пространственному распределению и минеральной ассоциации идентифицированы 3 типа хлорита (Chl-1, Chl-2, Chl-3).

Хлорит (Chl-1) присутствует в основной ткани породы в составе тонкочешуйчатого хлорит-серицитового агрегата (рис. 3, а), встречается в виде микровключений в кристаллах пирита (Chl-2) (рис. 4, а–с) и совместно с кварцем образует более крупночешуйчатые агрегаты вокруг хорошо образованных кристаллов пирита (Chl-3) (рис. 3, с, d; 4, с, d). В последнем случае можно

предполагать, что образование пирита и хлорита происходило одновременно при близкой температуре.

Проведено исследование химического состава включений хлорита (Chl-2) в кристаллах пирита и хлорита (Chl-3), обрамляющего кристаллы пирита в метасоматите (рис. 3, 4, поле шлифа 16108). Состав хлорита основной массы породы (Chl-1) не определялся. Результаты анализа состава хлорита представлены в таблице 2. Полученные данные использованы для расчета температур образования хлорита, ассоциирующего с кристаллами пирита.

В целом химический состав хлорита включений и метасоматитов варьирует в узком диапазоне содержания SiO_2 и Al_2O_3 : от 28.24 до 32.24 мас. % и от 17.77 до 21.45 мас. % соответственно (табл. 2). При этом состав двух включений хлорита в пирите существенно отличается повышенным содержанием SiO_2 (32.13 и 32.24 мас. %) в том же диапазоне содержания Al_2O_3 (17.77 и 20.33 мас. %) (табл. 2, рис. 5). Содержание MgO изме-

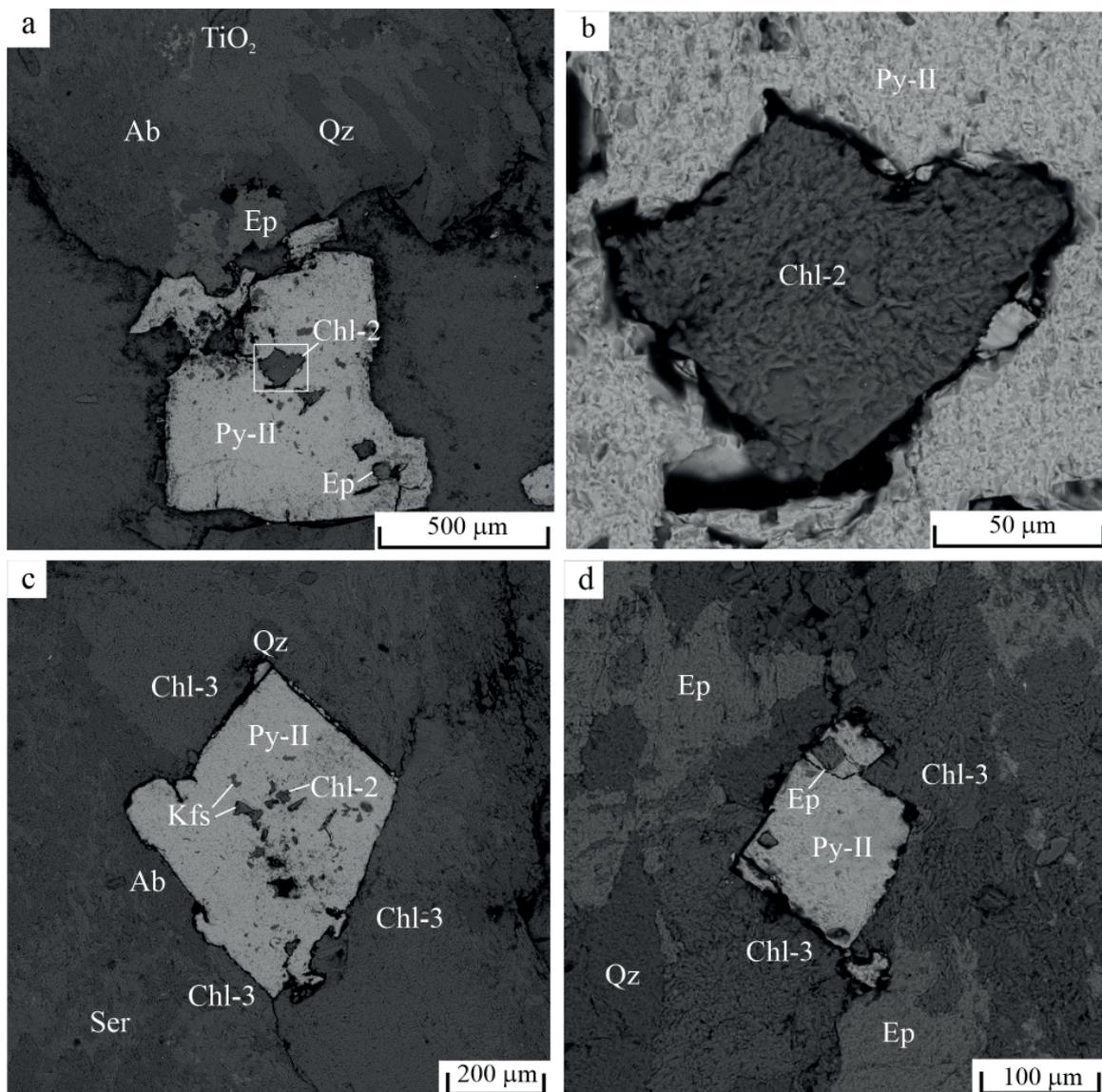


Рис. 4. Кристаллы пирита с микровключениями хлорита (а, b), калиевого полевого шпата (с), эпидота (а, d) в обрамлении крупнозернистого кварц-альбит-эпидот-хлоритового агрегата (шлиф 16108). BSE-изображения. Аббревиатуры минералов: Py — пирит, Chl — хлорит, Qz — кварц, Ep — эпидот, Ab — альбит, Kfs — калиевый полевой шпат, Ser — серицит

Fig. 4. Pyrite crystals with microinclusions of chlorite (a, b), potassium feldspar (c), epidote (a, d) in the frame of a coarse-grained quartz-albite-epidote-chlorite aggregate (section 16108). BSE images. Mineral abbreviations: Py — pyrite, Chl — chlorite, Qz — quartz, Ep — epidote, Ab — albite, Kfs — potassium feldspar, Ser — sericite



Таблица 2. Химический состав включений хлорита в зернах пирита и метасоматитах (мас. %) и рассчитанные температуры его образования

Table 2. Chemical composition of chlorite inclusions from pyrite grains and metasomatites (wt. %) and calculated temperatures of its formation

Включения хлорита в кристаллах пирита / Chlorite inclusions from pyrite crystals										
№ обр. / Sample No.	19 П	22 П	22а Кп	24 П	25 П	16108				
№ ан. / Analyses No.	1	2	3	4	5	1-1 П	2-1 П	4-1 П	5-2 П	5-4 Кп
SiO ₂	29.42	28.70	32.13	28.24	29.63	28.73	30.57	28.65	28.43	32.24
TiO ₂	-	-	-	-	1.41	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	19.47	18.99	17.77	19.21	16.48	21.14	19.43	21.45	20.72	20.33
FeO*	18.85	17.47	15.61	17.63	16.42	17.86	16.76	15.34	15.41	16.03
MnO	0.29	0.29	-	0.32	-	0.14	0.21	0.21	0.22	0.26
MgO	22.00	22.01	19.24	21.44	21.66	21.04	22.4	22.10	21.53	20.08
CaO	-	-	-	-	0.87	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	1.55	-	0.34	-	-	-	-	-
Сумма / Total	90.01	87.45	86.30	86.84	86.81	88.91	89.37	87.75	86.31	88.94

Кристаллохимические коэффициенты в формуле хлоритов (расчет на 10 катионов)
Crystallochemical coefficients in the chlorite formula (calculation for 10 cations)

Si	2.91	2.91	3.32	2.89	3.04	2.88	3.02	2.87	2.90	3.24
Ti	-	-	-	-	0.11	-	-	-	-	-
Al	2.27	2.27	2.16	2.31	1.99	2.49	2.27	2.53	2.49	2.40
Fe ^{II}	1.56	1.48	1.35	1.51	1.41	1.49	1.39	1.29	1.32	1.34
Mn	0.02	0.02	-	0.03	-	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	3.24	3.33	2.96	3.27	3.31	3.14	3.30	3.30	3.58	3.00
Ca	-	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-
K	-	-	0.20	-	0.04	-	-	-	-	-
x(Mg)	0.67	0.69	0.69	0.68	0.70	0.68	0.70	0.72	0.71	0.69
Al(IV)	1.09	1.09	0.68	1.11	0.96	1.13	0.98	1.13	1.10	0.77
Al(VI)	1.18	1.18	1.49	1.20	1.03	1.37	1.29	1.40	1.40	1.64
x(Fe)	0.33	0.31	0.31	0.32	0.30	0.32	0.30	0.28	0.29	0.31

Температура кристаллизации / Crystallization temperature

T ₁ , °C	289	290	157	296	247	301	251	302	292	185
T ₂ , °C	284	284	152	291	242	301	251	300	291	185
T ₃ , °C	237	237	162	241	213	243	216	244	238	178

Хлорит в метасоматите / Chlorite from the metasomatite

№ обр. / Sample No.	16108									
	1-2 П	2-4 П	2-5 П	2-6 П	2-8 П	3-1 П	3-2 П	4-4П		
SiO ₂	30.10	29.33	29.13	28.57	30.02	28.61	28.83	29.06		
Al ₂ O ₃	19.78	19.95	20.64	19.88	21.52	20.18	18.97	20.28		
FeO*	19.13	18.70	20.00	20.00	17.19	19.64	19.65	20.41		
MnO	0.30	0.22	0.30	0.32	0.18	0.28	0.23	0.24		
MgO	20.90	20.37	19.63	19.73	22.41	19.57	20.30	19.62		
Cr ₂ O ₃	-	-	0.23	-	-	-	-	-		
Сумма / Total	90.21	88.57	89.93	88.50	91.32	88.28	87.97	89.61		

Кристаллохимические коэффициенты в формуле хлоритов (расчет на 10 катионов)
Crystallochemical coefficients in the chlorite formula (calculation for 10 cations)

Si	3.08	2.94	2.95	2.85	2.97	2.86	2.95	2.93		
Al	2.38	2.36	2.46	2.34	2.51	2.38	2.28	2.36		
Fe ^{II}	1.59	1.57	1.67	1.48	1.39	1.50	1.68	1.72		
Mn	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02		
Mg	3.18	3.05	2.97	2.94	3.30	2.92	3.08	2.89		
Cr	-	-	0.02	-	-	-	-	-		
x(Mg)	0.66	0.66	0.64	0.66	0.70	0.66	0.65	0.63		
Al(IV)	0.92	1.06	1.05	1.15	1.03	1.13	1.05	1.07		
Al(VI)	1.46	1.30	1.42	1.20	1.49	1.25	1.22	1.28		
x(Fe)	0.33	0.34	0.36	0.34	0.30	0.34	0.35	0.37		



Окончание таблицы 2 / End of Table 2

Хлорит в метасоматите / Chlorite from the metasomatite									
№ обр. / Sample No	16108								
№ ан. / Analyses No	1-2 П	2-4 П	2-5 П	2-6 П	2-8 П	3-1 П	3-2 П	4-4П	
Температура кристаллизации/ Crystallization temperature									
T ₁ , °C	235	279	276	306	269	278	278	285	
T ₂ , °C	236	280	277	307	268	304	279	286	
T ₃ , °C	206	231	229	247	226	245	230	234	

Примечание. * — все железо приведено в форме FeO, Al(IV) дополняет позицию Si до 8 катионов, а Al(VI) составляет остальную часть общего расчетного количества Al. Разновидности хлорита: П — клинохлор (пикнохлорит), Кп — клинохлор (пеннин). Температуры рассчитаны по хлоритовым геотермометрам (табл. 1). Кристаллохимические формулы разновидностей клинохлора: пикнохлорит (Mg_{2.89-3.33} Fe_{1.48-1.72} Mn_{0.02-0.03} Al_{1.18-1.28})_{5.91-6.01} [Al_{1.05-1.11} Si_{2.95-2.89}]₄ O₁₀ (OH)_{8.09-8.17}; пеннин (Mg_{2.96-3.00} Fe_{1.34-1.35} Mn_{0.00-0.02} Al_{1.49-1.68})_{5.80-6.00} [Al_{0.68-0.77} Si_{3.24-3.32}]₄ O₁₀ (OH)_{8.41-8.91}.

Note: * — all iron is given as FeO, Al(IV) supplements Si position to 8 cations, and Al(VI) accounts for the rest part of the total calculated amount of Al. Chlorite varieties: P — clinochlore (pynochlorite), Kp — clinochlore (pennine). Temperatures are calculated using chlorite geothermometers (Table 1). Crystallochemical formulas of clinochlore varieties: pynochlorite (Mg_{2.89-3.33} Fe_{1.48-1.72} Mn_{0.02-0.03} Al_{1.18-1.28})_{5.91-6.01} [Al_{1.05-1.11} Si_{2.95-2.89}]₄ O₁₀ (OH)_{8.09-8.17}; pennine (Mg_{2.96-3.00} Fe_{1.34-1.35} Mn_{0.00-0.02} Al_{1.49-1.68})_{5.80-6.00} [Al_{0.68-0.77} Si_{3.24-3.32}]₄ O₁₀ (OH)_{8.41-8.91}.

няется от 19.24 до 22.21 мас. % (среднее — 20.90 мас. %), превышая содержание FeO (15.34 — 20.41 мас. %, среднее — 17.89 мас. %). В хлоритах в незначительных количествах присутствуют примеси Mn (0.14–0.32 мас. % или 0.01–0.03 а.ф.е.), редко Ti, Ca, K, Cr, их общее содержание не превышает 0.2–0.3 а.ф.е. (табл. 2). По соотношению Mg и Fe изученный минерал относится к типу Mg-хлорита (Zane, Weiss, 1998) и классифицируется как клинохлор (Wiewiora, Weiss, 1990). По содержанию Si^{IV} (а.ф.е.) обособляются две разновидности клинохлора, которые визуальнo выделяются на диаграмме Si — (Fe/Fe+Mg) (рис. 5) и по номенклатуре (Heu, 1954) попадают в поля пикнохлорита (преобладает) и пеннина. Выделение этих разновидностей клинохлора важно для последующего обсуждения условий их образования, поэтому далее, чтобы подчеркнуть различия их состава, мы будем использовать названия «клинохлор (пикнохлорит)» и «клинохлор (пеннин)».

Клинохлор (пикнохлорит) включений в пирите имеет железистость x(Fe) 0.28–0.33, метасоматитов x(Fe) 0.30–0.37, а клинохлор (пеннин) — x(Fe) 0.31 (табл. 2). Клинохлор (пикнохлорит) включений характеризуется содержанием Si^{IV} 2.87–3.02 (а.ф.е.), коэф-

фициентом магнeзиальности x(Mg) 0.67–0.72, отношением Si^{IV}/Al 0.99–1.53; метасоматитов — содержанием Si^{IV} 2.85–3.08 (а.ф.е.), коэффициентом магнeзиальности x(Mg) 0.63–0.70, отношением Si^{IV}/Al 1.18–1.25, клинохлор (пеннин) — содержанием Si^{IV} 3.24–3.32 (а.ф.е.), коэффициентом магнeзиальности x(Mg) 0.69, отношением Si^{IV}/Al 1.35–1.54. Следует отметить, что клинохлор (пеннин) встречается только в виде микровключений в кристаллах пирита, он не обнаружен в метасоматитах.

Выбор тех или иных хлоритовых геотермометров для оценки температур образования хлорита в значительной степени зависит от состава минерала. Полученные данные по составу клинохлора рудопроявления Ягодное показывают, что он относится к маложелезистой разновидности (x(Fe) < 0.34), поэтому при расчете температур его образования использованы следующие геотермометры (Cathelineau, 1988; Jowett, 1991; Котельников и др., 2012).

Рассчитанные по уравнениям (Cathelineau, 1988; Jowett, 1991) температуры образования хлоритов, ассоциирующих с пиритом, практически не отличаются между собой (табл. 3), колеблются от 242 до 302 °C для

Таблица 3. Сравнение рассчитанных температур образования хлорита по разным термометрам

Table 3. Comparison of calculated temperatures of chlorite formation using different thermometers

Минерал Mineral	T °C	Интервал температур, T °C Temperature range, T°C	Среднее значение, T °C Average value, T°C	Медианное значение, T °C Median value, T°C
Клинохлор (пикнохлорит) — включения в пирите Clinochlore (pynochlorite) — inclusions in pyrite	T ₁ °C	247–302	284	275 ± 28
	T ₂ °C	242–301	282	272 ± 30
	T ₃ °C	213–244	234	228 ± 15
Клинохлор (пикнохлорит) в метасоматите Clinochlore (pynochlorite) in metasomatite	T ₁ °C	235–306	276	270 ± 35
	T ₂ °C	236–307	280	271 ± 35
	T ₃ °C	206–245	231	225 ± 20
Клинохлор (пеннин) — включения в пирите Clinochlore (pennine) — inclusions in pyrite	T ₁ °C	157–185	171	171 ± 14
	T ₂ °C	152–185	168	168 ± 17
	T ₃ °C	162–178	170	170 ± 8

Примечание. Соответствие T₁, T₂, T₃ °C геотермометрам разных авторов см. в таблице 1.

Note: For the correspondence of T₁, T₂, T₃ °C to geothermometers of different authors, see Table 1.



включений клинохлора (пикнохлорита) в пирите и от 235 до 307 °С в метасоматите. Температуры, полученные по уравнению (Котельников и др., 2012) существенно ниже и варьируют от 213 до 244 °С и от 206 до 245 °С для клинохлора (пикнохлорита) включений и метасоматитов соответственно. Хорошая сходимость значений по всем трем геотермометрам наблюдается для температуры образования клинохлора (пеннина) с колебаниями от 152 до 185 °С. С учетом незначительного расхождения расчетных температур (по Cathelineau, 1988; Jowett, 1991) на диаграмме Si — Fe/(Fe+Mg) (рис. 5) показаны температуры кристаллизации хлоритов (по Cathelineau, 1988).

Обсуждение

Согласно предыдущим исследованиям (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001), в центральной части Манитаньрдского района, в Нияюской рудной зоне, все позднерифейско-раннекембрийские породы бедамельской серии и энганепэйской свиты метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации. На золотосульфидно-кварцевых жильных рудопроявлениях этими авторами установлены околорудные метасоматиты двух формаций: пропилитовой и березит-лиственитовой. Пропилиты имеют региональное

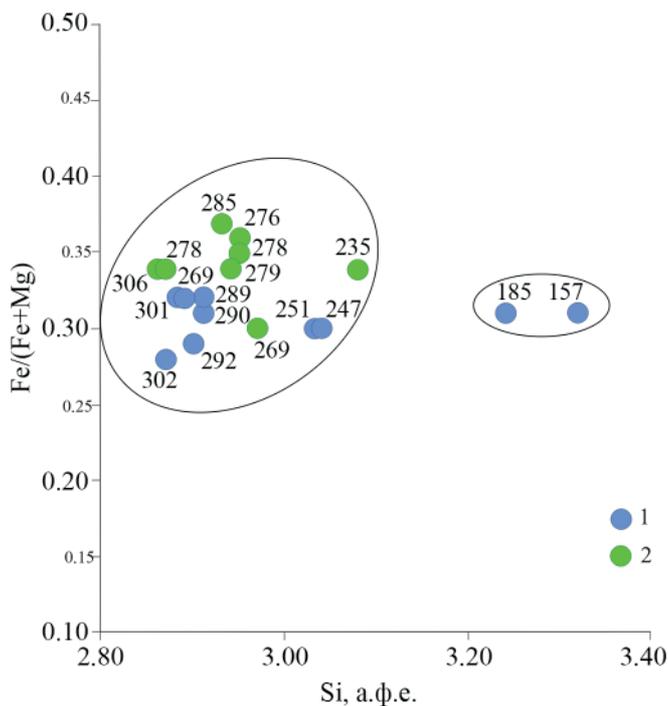


Рис. 5. Составы хлоритов на классификационной диаграмме (Hey, 1954 с изменениями).

Анализы включений клинохлора (пикнохлорит + пеннин) в кристаллах пирита (1), клинохлора (пикнохлорит) в метасоматите (2). Цифрами показаны температуры, рассчитанные с помощью хлоритового геотермометра (Cathelineau, 1988) (табл. 1 и 2)

Fig. 5. Chlorite compositions on the classification diagram (Hey, 1954 with changes).

Analysis of clinochlore (pynochlorite + pennine) inclusions in pyrite crystals (1), clinochlore (pynochlorite) in metasomatite (2). Numbers show the formation temperatures calculated with a chlorite geothermometer (Cathelineau, 1988) (Tables 1 and 2)

распространение в рудной зоне и характеризуются несколькими парагенезисами: эпидот + актинолит + кварц, эпидот + хлорит + кварц, эпидот + кварц. Поздние метасоматиты имеют непостоянный состав — от кварц-серицит + кальцит (кварц-серицитовые) до кварц-серицит + доломит-анкерит (березиты), которые наиболее четко проявлены на месторождении Верхне-нияюское-2. На рудопроявлениях Нияхойское-1 и -2 (рис. 1) рудная минерализация жильного и штокверкового типа также сопровождается метасоматитами двух указанных формаций, причем с пропилитами связаны золотоносные пиритовые руды вкрапленного типа (Вахрушев, Макаров, 1986; Сазонов и др., 2001).

Во вмещающих породах основного состава золотоносного интервала рудопроявления Ягодное нами установлена следующая новообразованная ассоциация минералов — (эпидот) актинолит + (хлорит + серицит) + альбит с агрегатным мелкозернистым пиритом, с сохранением на некоторых участках реликтов протолита в виде обособлений слабо разложившейся стекловатой массы породы основного состава (рис. 3, а). С одной стороны, такая ассоциация характерна для метаморфических пород фации зеленых сланцев, с другой стороны, аналогичная минеральная ассоциация является типоморфной для эпидот-хлоритовой фации пропилитов, где один из основных минералов парагенезисов в метасоматической колонке представлен хлоритом (пикнохлоритом) (Арутюнян, 2008; Знаменский, 2023; Шафигуллина, Знаменский, Косарев, 2020). Часто различить зеленосланцевые метаморфиты и пропилиты бывает затруднительно, но их принципиальным отличием является присутствие в последних рудной минерализации (Жданов, 2005; Петрографический кодекс, 2008). В плане идентификации характера изменений пород в золотоносном интервале рудопроявления Ягодное формирование в тонкозернистой породе крупнозернистых гранобластовых сегрегаций кварца, хлорита, альбита, эпидота, серицита вокруг крупных кристаллов пирита свидетельствует о проявлении метасоматического процесса. Состав метасоматитов — эпидот-альбит-кварц-хлоритовый+пирит (или эпидот-альбит-хлорит-кварцевый + пирит). Таким образом, мы относим новообразованную ассоциацию минерализованных пород к эпидот-хлоритовой субфации пропилитовой фации метасоматитов, тем более что они локализируются в пределах Нияюской рудной зоны и содержат рудную минерализацию в виде золотоносного пирита (Жданов, 2005; Петрографический кодекс, 2008).

Практически идентичный химический состав клинохлора (пикнохлорита) включений в кристаллах пирита (Chl-2) и в его обрамлении в метасоматите (Chl-3) позволяет предположить их одновременное образование, сопряженное с ростом метакристаллов пирита, в едином метасоматическом процессе.

Рассчитанные температуры образования клинохлора (пикнохлорита) включений в пирите и в метасоматитах составляют 302–247 °С и 306–235 °С соответственно, т. е. практически не различаются. Температуру образования единичных включений клинохлора (пеннина) в кристаллах пирита 185–157 °С, по-видимому, можно рассматривать как нижний предел метасоматического процесса. Общий температурный интервал образования хлоритов составляет в 306–157 °С с пиком температуры 306–235 °С.

Выводы

1. Вмещающие породы золотоносного интервала минерализованной зоны рудопоявления Ягодное представлены пропилитами — метасоматитами эпидот + актинолит + альбит + хлоритового состава с присутствием участков средне-крупнозернистого гранобластового агрегата альбит-кварц-хлоритового состава с эпидотом и крупными, хорошо ограниченными метакристаллами пирита.

2. По пространственному распределению и минеральной ассоциации выделены три разновидности хлорита (Chl): в составе тонкочешуйчатого хлорит-серицитового агрегата в основной ткани породы (Chl-1); в виде микровключений в метакристаллах пирита (Chl-2); ассоциирующий с метакристаллами пирита в гранобластовых агрегатах метасоматитов (Chl-3).

3. Chl-2 и Chl-3 по химическому составу отвечают клинохлору (пикнохлориту), который присутствует как в виде включений в кристаллах пирита, так и в метасоматитах. Они практически не различаются между собой, что свидетельствует об одновременном образовании. Единичные микровключения Chl-2 в метакристаллах пирита отвечают клинохлору (пеннину).

4. Рассчитанные температуры формирования клинохлора Chl-2 и Chl-3, ассоциирующего с метакристаллами пирита, ложатся практически в один и тот же интервал 302–247 °С и 306–235 °С соответственно. Для клинохлора (пеннина) этот интервал ниже и составляет 185–157 °С.

5. Тесная ассоциация хлорита и метакристаллов золотоносного пирита в гранобластовых агрегатах свидетельствует об их одновременном образовании в течение единого метасоматического процесса в температурном интервале 306–157 °С с пиком температуры 306–235 °С.

Авторы выражают искреннюю признательность анонимным рецензентам за внимательное рассмотрение представленной статьи, ценные замечания, исправление которых, несомненно, улучшило её качество, и рекомендации, которые будут учтены в дальнейших исследованиях и публикациях.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 1220406000009-2.

Литература / References

Арутюнян М. А. Характер проявления прерудной пропилитизации в диорит-порфиритах Каджаранского рудного поля // Известия НАН РА. Науки о Земле. 2008. Т. 61. № 2. С. 29–34.
Narutyunian M. A. The character of preore propylitization occurrence in diorite-porphyrates or the Kajaran ore field. News of the NAS RA. Earth Sciences. 2008, V. 61, No. 2, pp. 29–34. (in Russian)

Вахрушев С. Н., Макаров А. Б. Минералого-геохимические особенности руд и метасоматитов золотомышьяковых проявлений одного из районов // Геохимия и минералогия первичных и вторичных ореолов. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1986. С. 84–93.
Vakhrushev S. N., Makarov A. B. Mineralogical and geochemical features of ores and metasomatites of gold-arsenic manifestations of one of the regions. Geochemistry and mineralogy of primary and secondary halos.

Sverdlovsk, Publishing house of the Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, 1986, pp. 84–93. (in Russian)

Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-V, VI (Воркута). Объяснительная записка / М. А. Шишкин, О. Н. Мalykh, П. Е. Попов, Л. С. Колесник. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 262 с.

State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Second edition. In Ser. Polar-Urals. Sheet Q-41-V, VI (Vorkuta). Explanatory Note Kart / M. A. Shishkin, O. N. Malykh, P. E. Popov, L. S. Kolesnik. MF VSEGEI: Moscow, 2013, 262 p.

Ефанова Л. И. Нияуская рудная зона. Кряж Манитанырд // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2020): Материалы российской конференции с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2020. С. 192–194.

Efanova L. I. Niyauskaya ore zone. Manitanyrd ridge Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin readings — 2020): Proceedings of the Russian conference with international participation. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS. 2020, pp. 192–194. (in Russian)

Ефанова Л. И., Ковальчук Н. С., Майорова Т. П. Микропримеси в пирите золоторудных проявлений хребта Манитанырд (Полярный Урал) // Руды и металлы. 2024. № 2. С. 36–62. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10017

Efanova L. I., Kovalchuk N. S., Mayorova T. P. Microimpurities in pyrite of gold-ore occurrences of the Manitanyrd ridge (the Polar Urals) Ores and metals, 2024, No. 2, pp. 36–62. (in Russian)

Ефанова Л. И., Кузнецов С. К., Тарбаев М. Б., Майорова Т. П. Золотоносность Манитанырдского района и перспективы наращивания ресурсного потенциала (Полярный Урал) // Руды и металлы. 2020. № 3. С. 39–51. DOI: 10.24411/0869-5997-2020-100

Efanova L. I., Kuznetsov S. K., Tarbaev M. B., Mayorova T. P. Gold content of the Manitanyrdsky area and prospects for resource potential ramp-up (Polar Urals). Ores and Metals, 2020, No. 3, pp. 39–51. (in Russian)

Жданов В. В. К проблеме классификации метаморфических и метасоматических пород // Зап. ВМО. 2005. Ч. CXXXIV. № 3. С. 131–140.

Zhdanov V. V. Problem of classification of metamorphic and metasomatic rocks. Zapiski RMO, 2005, CXXXIV, No. 4, pp. 58–71. (in Russian)

Знаменский С. Е. Минералогия и P-T условия образования метасоматических пород Вознесенского месторождения золота (Южный Урал) // Литосфера. 2023. 23(3). С. 430–446. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-430-446>

Znamensky S. E. Mineralogy and P-T conditions for the formation of metasomatic rocks of the Voznesenskoye gold deposit (Southern Urals) Lithosphere (Russia), 2023/23(3), pp. 430–446. (in Russian)

Котельников А. Р., Сук Н. И., Котельникова З. А., Щекина Т. И., Калинин Г. М. Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. NZ9001. doi:10.2205/2012NZ_ASEMPG.

Kotelnikov A. R., Suk N. I., Kotelnikova Z. A., Shchekina T. I., Kalinin G. M. Mineral geothermometers for low-temper-



- ature parageneses. Bulletin of the Earth Sciences Department of the Russian Academy of Sciences, 2012, V. 4, (in Russian)
- Кузнецов С. К., Майорова Т. П., Сокина Н. В., Филиппов В. Н. Золоторудная минерализация Верхнеуральского месторождения на Полярном Урале // Записки РМО. 2011. Ч. СХХХХ. № 4. С. 58–71.
- Kuznetsov S. K., Mayorova T. P., Sokerina N. V., Filippov V. N. Gold-ore mineralization of the Verkhneiyayus deposit, the Polar Urals. Zapiski RMO, 2011, СХХХХ, No. 4, pp. 58–71. (in Russian)
- Майорова Т. П., Ефанова Л. И. Проявление золотомышьяковистого типа Нияхойское-2 на Полярном Урале (кряж Манитаньрд) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 8. С. 33–41. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-8-33-41
- Mayorova T. P., Efanova L. I. Occurrence of the gold-arsenic type Niyakhoy-2 in the Polar Urals (Manitanyrd ridge) Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2019, No. 8, pp. 33–41. (in Russian)
- Майорова Т. П., Ефанова Л. И., Сокина Н. В. Минералогическо-геохимические особенности руд золото-кварц-сульфидного проявления Верхнелекелецкое на Полярном Урале (кряж Манитаньрд) // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 10–25. DOI: 10.19110/geov.2022.6.2
- Mayorova T. P., Efanova L. I., Sokerina N. V. Mineralogical and geochemical features of the ores of the Verkhnelekeletskeye gold-quartz-sulfide occurrence in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge). Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 10–25. (in Russian)
- Петрографический кодекс (магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования) / Под ред. О. А. Богатикова, О. В. Петрова. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. 204 с.
- Petrographic code of Russia (magmatic, metamorphic, metasomatic, impact rock-assemblages). Editors-in-chief O. A. Bogatikov, O. V. Petrov. St. Petersburg VSEGEI Press, 2008, 204 p. (in Russian)
- Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГА, 2001. 622 с.
- Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu. A. Gold deposits of the Urals. Yekaterinburg: Publishing house of the Ural State Mining and Geotechnical Academy, 2001. 622 p. (in Russian)
- Шафигуллина Г. Т., Знаменский С. Е., Косарев А. М. Условия образования золотопорфирового оруденения месторождения Большой Каран (Южный Урал) по данным хлоритовой геотермометрии // Геологический вестник. 2020. № 2. С. 45–53. http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-2-4
- Shafigullina G. T., Znamensky S. E., Kosarev A. M. Conditions for the formation of gold-porphyr mineralization of the Bolshoy Karan deposit (Southern Urals) according to chlorite geothermometry. Geologicheskii vestnik, 2020, No. 2, pp. 45–53. (in Russian)
- Bailey S. W. Summary of recommendations of AIPEA Nomenclature Committee // Clays and Clay Minerals, 1980. V.15. P. 85–93. DOI: https://doi.org/10.1180/claymin.1980.015.1.07
- Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature // Clay Miner. 1988, V. 23, P. 471–485. doi: 10.1180/claymin.1988.023.4.13
- Cathelineau M., Neiva D. A chlorite solid solution geothermometer the Los Asufres (Mexico) geothermal system // Contrib. Mineral. Petrol., 1985. V.91. P. 235–244.
- Hey M.H. A new review of chlorites // Miner. Mag. 1954. V. 30. N 224. P. 277–292. doi:10.1180/minmag.1954.030.224.01
- Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas) / S.W. Bailey et al.; ed. by S.W. Bailey. Review of Mineralogy, 1991. V. 19. P. 719.
- Inoue A., Kurokawa K., Hatta T. Application of Chlorite Geothermometry to Hydrothermal Alteration in Toyoha Geothermal System, Southwestern Hokkaido, Japan // Resource Geology, 2010. V. 60, No. 1: 52–70. https://doi: 10.1111/j.1751-3928.2010.00114.x
- Jowett E. C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer // GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting, Toronto, May 27–29, 1991, Program with Abstracts 16. A 62. 1991.
- Kranidiotis P., MacLean W.H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec // Economic Geology. 1987. V. 82. P. 1898–1911. DOI: 10.2113/GSECONGEO.82.7.1898
- Martinez-Serrano R.G., Dubois M. Chemical variations in chlorite at the Los Humeros geothermal system, Mexico // Clays and Clay Minerals, 1998. V. 46. No. 6. P. 615–628
- Mayorova T. P., Kuznetsov S. K., Efanova L. I., Sokerina N. V. Gold-Sulfide Mineralization in the Manitanyrd Region, Polar Urals, Russia // Minerals, 2023, 13(6), 747. https://doi.org/10.3390/min13060747
- Wang Y., Fan H., Pang Y., Xiao W. Geochemical Characteristics of Chlorite in Xiangshan Uranium Ore Field, South China and Its Exploration Implication // Minerals 2022, 12, 693. https://doi.org/10.3390/min12060693
- Wiewiora A., Weiss Z. Crystallochemical Classifications of Phyllosilicates Based on the Unified System of Projection of Chemical Composition; II, The Chlorite Group // Clay Miner. 1990, 25. P. 83–92. doi:10.1180/claymin.1990.025.1.09
- Zane A., Weiss Z. A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data // Rend. Fis. Acc. Lincei, 1998. V. 9. P. 51–56.
- Zang W., Fyfe W. S. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil // Mineralium Deposita. 1995. V. 30. No. 1. V. 30–38.

Поступила в редакцию / Received 23.04.2025