

Научная статья  
УДК 553.2



## ТИПОМОРФИЗМ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ХЛОРИТА КАРАГАЙКУЛЬСКОГО ЗОЛОТО-ПОРФИРОВОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Г. Т. Шафигуллина<sup>1</sup>, С. Е. Знаменский<sup>2</sup>, А. М. Косарев<sup>3</sup>

*Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа, Россия*

1 — *shafigullina\_g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1044-7423>*

2 — *Znamensky\_Sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1844-4956>*

3 — *amkosarev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4653-8466>*

Изучен химический состав и температурные условия образования хлорита метасоматических пород Карагайкульского рудопроявления, расположенного в зоне Главного Уральского разлома на Южном Урале. Состав хлорита определялся на сканирующем электронном микроскопе TES-CAN VEGA Compact, с энергодисперсионным спектрометром Xplore 15 (Oxford Instruments), в Институте геологии УФИЦ РАН, г. Уфа. Для оценки температур образования хлоритов использован геотермометр [Cathelineau, 1988]. Показано, что в безрудных пропилитах хлорит представлен рипидолитом, брусвигитом, клинохлором и пеннинном. Температура образования рипидолита оценивается в 330–364 °С, брусвигита — в 292–294 °С, клинохлора — в 234–254 °С, пеннина — в 208 °С. Хлорит рудоносных пропилитов отвечает рипидолиту, пикнохлориту и диабантиту, которые кристаллизовались при температуре 204–350 °С. Рипидолит безрудных пропилитов более железистый ( $X(\text{Fe}) = 0.60\text{--}0.93$ ) по сравнению с рипидолитом рудоносных пропилитов ( $X(\text{Fe}) = 0.37\text{--}0.45$ ). Основной механизм изоморфного замещения в структуре хлорита, который контролировал изменения состава хлорита от рипидолита к пеннину/диабантиту, представлен замещением  $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  в октаэдрических слоях. Помимо изоморфного замещения  $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Mg}$  в хлорите установлено чермакитовое замещение с уменьшением его доли в хлорите безрудных (пеннин) и рудоносных (диабантит) пропилитов. В пропилитах изменение состава хлорита контролировалось температурой и составом минералообразующего флюида. В безрудных пропилитах температура играла важную роль при замещении  $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Mg}$  в хлорите. В рудоносных пропилитах на изменение состава хлорита, кроме температуры, оказывало влияние активность сульфидной серы. Хлорит пропилитов, кристаллизовавшийся в интервале температур 204–364 °С соответствует диапазону температур образования пропилитов биотит-актинолитовой, эпидот-хлоритовой и альбит-хлорит-кальцитовой фациям. Формирование их происходило в мезотермальных условиях.

*Ключевые слова:* Хлорит, пропилиты, температура кристаллизации, рудопроявление

*Благодарности:* Работа выполнена в рамках программы государственного заказа ИГ УФИЦ РАН № FMRS-2025–0014.

Для цитирования: Шафигуллина Г. Т., Знаменский С. Е., Косарев А. М. Типоморфизм и физико-химические условия образования хлорита Карагайкульского золото-порфинового рудопроявления (Южный Урал) // Геологический вестник. 2026. № 1. С. 84–98. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2026-1-8>

For citation: Shafigullina G. T., Znamensky S. E., Kosarev A. M. (2026) Typomorphism and physicochemical conditions of formation of chlorite of the Karagaikul gold-porphyry ore occurrence (Southern Urals). *Geologicheskii vestnik*. 2026. No. 1. P. 84–98. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2026-1-8>

© Г. Т. Шафигуллина, С. Е. Знаменский, А. М. Косарев, 2026

Original article

## TYPOMORPHISM AND PHYSICO-CHEMICAL CONDITIONS OF FORMATION OF CHLORITE OF THE KARAGAIKUL GOLD-PORPHYRY ORE OCCURRENCE (SOUTHERN URALS)

G. T. Shafigullina<sup>1</sup>, S. E. Znamensky<sup>2</sup>, A. M. Kosarev<sup>3</sup>

*Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre  
of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia*

1 — shafigullina\_g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1044-7423>

2 — Znamensky\_Sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1844-4956>

3 — amkosarev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4653-8466>

The chemical composition and temperature conditions of chlorite formation in metasomatic rocks of the Karagaykul ore occurrence, located in the Main Ural Fault zone in the Southern Urals, were studied. The chlorite composition was determined using a TESCAN VEGA Compact scanning electron microscope with an Xplore 15 energy-dispersive spectrometer (Oxford Instruments) at the Institute of Geology, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Ufa. A geothermometer was used to estimate the temperatures of chlorite formation [Cathelineau, 1988]. It is shown that in barren propylites, chlorite is represented by ripidolite, brunsvigite, clinochlore, and pennine. The formation temperature of ripidolite is estimated at 330–364 °C, brunsvigite at 292–294 °C, clinochlore at 234–254 °C, and pennine at 208 °C. Chlorite of ore-bearing propylites corresponds to ripidolite, pycnochlorite, and diabantite, which crystallized at a temperature of 204–350 °C. Ripidolite of barren propylites is more ferruginous ( $X(\text{Fe}) = 0.60\text{--}0.93$ ) compared to ripidolite of ore-bearing propylites ( $X(\text{Fe}) = 0.37\text{--}0.45$ ). The main mechanism of isomorphic substitution in the chlorite structure, which controlled the changes composition chlorite from ripidolite to pennine/diabantite, is represented by the substitution of  $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  in octahedral layers. In addition to the isomorphic substitution of  $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  in chlorite, chermakite substitution has been established with a decrease in its share in the chlorite of ore-free (pennin) and ore-bearing (diabantite) propylites. In propylites, the change in chlorite composition was controlled by the temperature and composition of the mineral-forming fluid. In ore-free propylites, temperature played an important role in the substitution of  $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  in chlorite. In ore-bearing propylites, the change in the composition of chlorite, in addition to temperature, was influenced by the activity of sulfide sulfur. Propylite chlorite crystallized in the temperature range of 204–364 °C corresponds to the temperature range of formation of propylite biotite-actinolite, epidote-chlorite and albite-chlorite-calcite facies. Their formation took place under mesothermal conditions.

*Keywords:* Chlorite, propylites, crystallization temperature, ore occurrence

*Acknowledgements:* The work was carried out within the framework of the state order program of the Institute of Geology of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences No. FMRS-2025–0014.

### Введение

Карагайкульское рудопоявление расположено в зоне Главного Уральского разлома, в Учалинском районе Республики Башкортостан, в 1.0 км к востоку от озера Карагайкуль. Оно относится к редкому и относительно слабо изученному на Урале золото-порфировому типу.

В опубликованных работах приведены сведения о изотопном возрасте интрузивных пород рудопоявления [Косарев и др., 2014], рассмотрены региональная позиция и современная струк-

тура [Знаменский, 2019; 2021], изучены петролого-геохимические особенности интрузивных пород, возможные источники магматических расплавов, а также по данным единичных анализов охарактеризован химический состав минералов околорудных метасоматитов и руд Карагайкульского рудопоявления [Знаменский и др., 2022].

Цель настоящей статьи — на основе новых более представительных данных рассмотреть типоморфные особенности и условия образования хлорита метасоматических пород Карагайкульского рудопоявления.

### Краткая геологическая характеристика Карагайкульского рудопоявления

По данным [Знаменский, 2021], в современной структуре зоны Главного Уральского разлома Карагайкульское рудопоявление приурочено к осевой части коллизионного Яльчигуловского транспрессивного сдвига север-северо-восточного простирания. На южном фланге рудопоявления находится дайкообразное в плане тело габбро-диоритов, вытянутое в северо-восточном направлении на расстояние около 750 м при ширине до 200 м (рис. 1). На его простирании на северном фланге рудопоявления локализована серия даек габбро, габбро-диоритов и диоритов. Они имеют длину по простиранию 50–300 м. Мощность даек обычно не превышает 2–3 м. Диориты имеют Sm-Nd изохронный возраст  $418 \pm 25$  млн лет [Косарев и др., 2014].

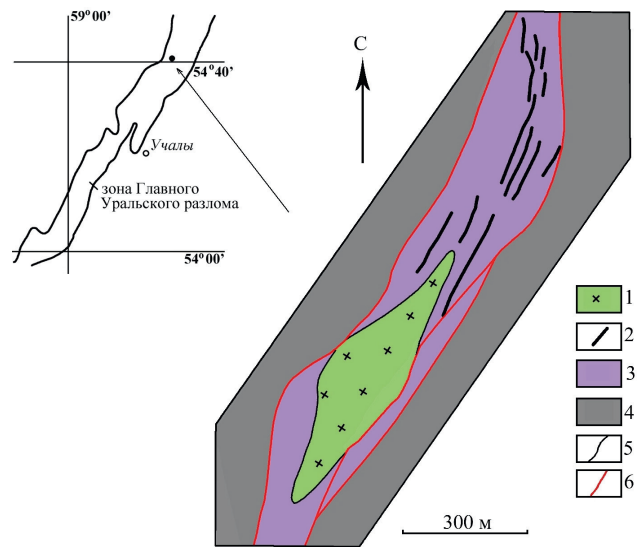
Габбро, габбро-диориты и диориты состоят из плагиоклаза, роговой обманки и небольшого количества клинопироксена. Содержание  $\text{SiO}_2$  в породах варьирует от 51 до 61 мас. % [Знаменский и др., 2022]. Они представляют собой надсубдукционные магматиты нормальной щелочности, принадлежащие к переходной толеитовой — известково-щелочной и отчасти к известково-щелочной петрогенетическим сериям. Интрузивные породы сформировались из флюидонасыщенных расплавов, по-видимому, находившихся первоначально в окисленном состоянии.

Золотоносные кварц-сульфидные штокверки развиты вдоль контактов даек. Сульфидные минералы в золотоносных штокверках представлены пиритом, халькопиритом, галенитом, пентландитом, пирротинитом и виоларитом.

Интрузивные породы подверглись в околорудном ореоле пропилитизации биотит-актинолитовой фации, а вмещающие их серпентинизированные ультрабазиты — карбонатизации [Знаменский и др., 2022]. В составе пропилитов установлены: калиевый полевой шпат, актинолит, эпидот, биотит, хлорит и кварц.

### Методика исследования

Определение химического состава хлорита проведено на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA Compact, с энергодисперсионным спектрометром Xplore 15 (Oxford Instruments), в Институте геологии УФИЦ РАН, г. Уфа (аналитик С. С. Ковалев).



**Рис. 1. Геологическая схема Карагайкульского рудопоявления [Знаменский и др., 2022]**

Условные обозначения: 1 — габбро-диориты; 2 — дайки габбро, габбро-диоритов и диоритов (мощность показана вне масштаба); 3 — серпентинизированные ультрабазиты и серпентинитокластические брекчии; 4 — пакеты тектонических пластин; 5 — геологические границы; 6 — взбросо-сдвиги, ограничивающие осевую часть Яльчигуловского разлома.

**Fig. 1. Geological scheme of the Karagaykul ore occurrence [Znamensky et al., 2022]**

Legend: 1 — gabbro-diorites; 2 — gabbro, gabbro-diorite, and diorite dikes (thickness is shown out of scale); 3 — serpentinized ultramafic rocks and serpentinite-clastic breccias; 4 — tectonic plate packages; 5 — geological boundaries; 6 — reverse-slip faults delimiting the axial part of the Yalchigulov fault.

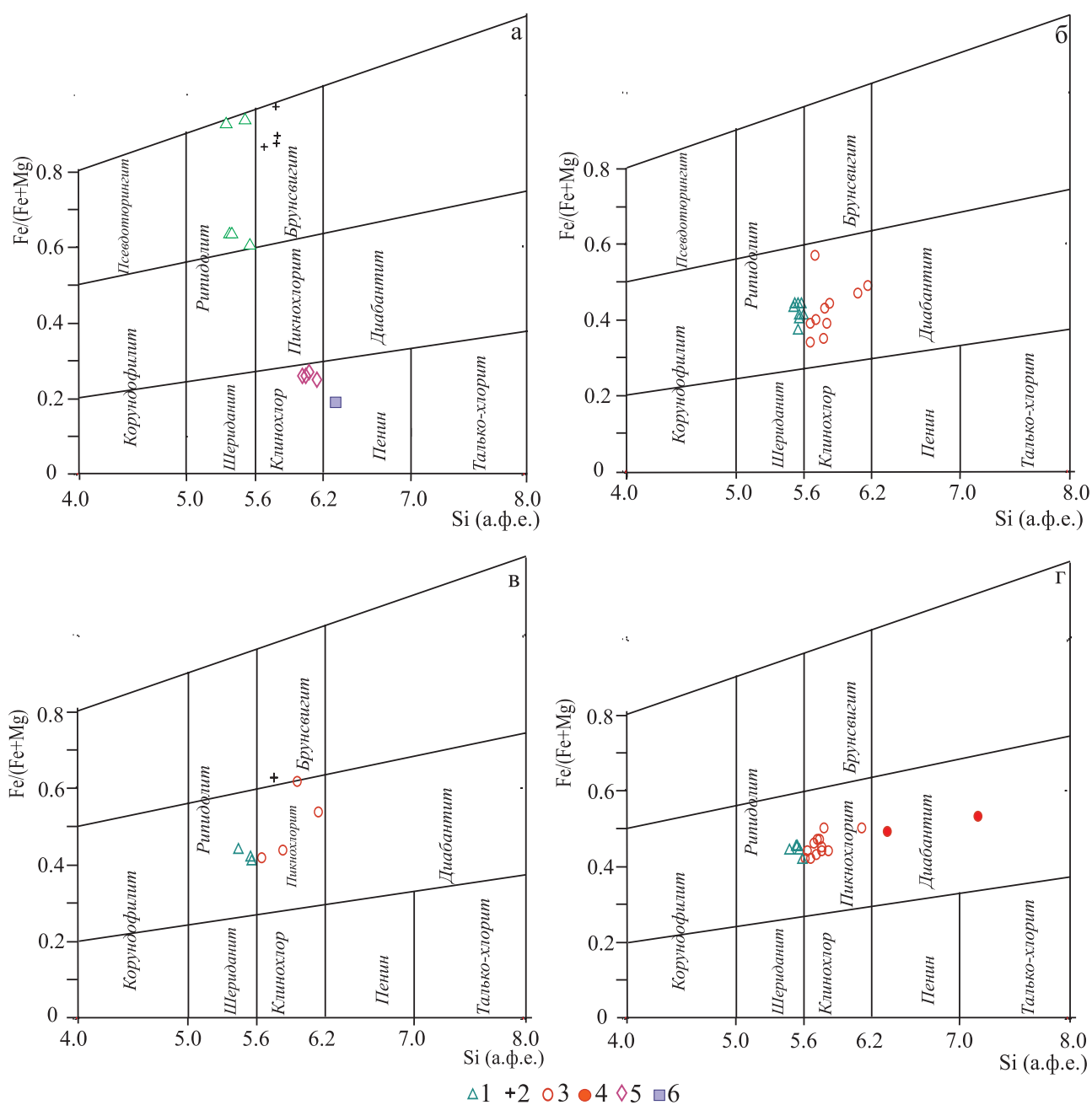
Температурные условия образования хлорита оценены с помощью эмпирического хлоритового геотермометра:  $T, ^\circ\text{C} = -61.92 + 321.98 \times \text{Al}^{\text{IV}}_{014}$  [Cathelineau, 1988]. Структурная формула хлорита рассчитана на 20 атомов кислорода.

### Результаты исследований

Химический состав хлорита изучен в безрудных и рудоносных метасоматически измененных дайках (табл. 1 и 2).

По данным электронно-микроскопических исследований в пропилитизированном амфиболовом габбро (образец 35–17), не содержащем сульфидную минерализацию, установлены 4 разновидности хлорита.

Хлорит-1 по [Heu, 1954] относится к пеннину ( $\text{Si} = 6.32$  ф. е.) (рис. 2а), который имеет низкую железистость  $X(\text{Fe}) = 0.19$  и высокую магнезиальность  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) = 0.80$ . Содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  составляет 16.48 мас. %. Для данного хло-



**Рис. 2. Классификационная диаграмма для хлоритов безрудных и рудоносных пропилитов, по [Hey, 1954]**

Условные обозначения: а — г — Метасоматически измененные дайки: а — безрудные (образец 35–17, габбро); б — г — рудоносные (б — образец 5–12/1, габбро, в — образец 7–12/1, габбро-диорит, г — образец 10–18/1, диорит). 1 — рипидолит, 2 — брунсвицит, 3 — пикнохлорит, 4 — диабантит, 5 — клинохлор, 6 — пеннин.

**Fig. 2. Classification diagram for chlorites after [Hey, 1954]**

Legend: а — г — Metasomatically altered dikes: а — barren (sample 35–17, gabbro); б — г — ore-bearing (б — sample 5–12/1, gabbro, в — sample 7–12/1, gabbro-diorite, г — sample 10–18/1, diorite). 1 — ripidolite, 2 — brunsvigite, 3 — pycnochlorite, 4 — diabantite, 5 — clinochlore, 6 — pennine.

рита характерно преобладание октаэдрического алюминия ( $Al^{VI}$ ) над алюминием в тетраэдрической позиции ( $Al^{IV}$ ), что указывает на слабо кислую среду [Русинов, 1989; Арутюнян, 2008] и низкую температуру минералообразования. Рассчитанная по геотермометру [Cathelineau,

1988] температура образования для хлорита-1 составляет 208 °С. Пеннин установлен в пропилитах многих медно-порфировых месторождений Урала [Грабежев, Белгородский, 1992; Шардакова и др., 2023].

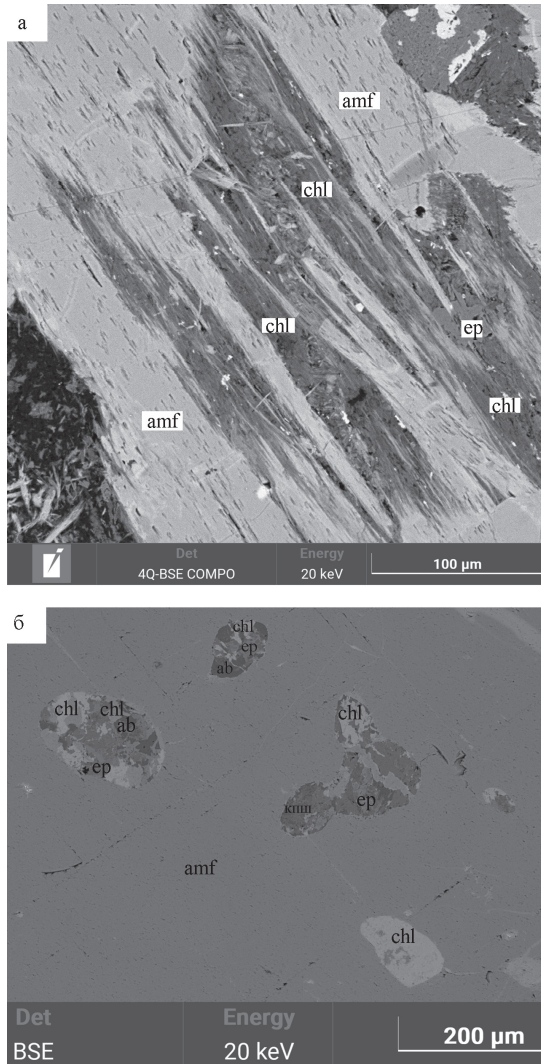
Хлорит-2 частично замещает по трещинам спайности амфибол (рис. 3а). На классификационной диаграмме Si–(Fe/Fe+Mg) [Heu, 1954] (см. рис. 2а) точки химических составов данного хлорита соответствуют клинохлору. Он отличается от хлорита-1 большими значениями  $Si^{IV}$  и железистости X (Fe) — 0.25–0.27 и меньшими магнезиальности X (Mg) 0.72–0.73. Содержание  $Al_2O_3$  — 17.66–18.28 мас. %. Количество  $Al^{VI}$  выше количества  $Al^{IV}$ , что характеризует слабо кислую среду. Температура кристаллизации по геотермометру [Cathelineau, 1988] составляет 234–254 °С.

Хлорит-3 (рипидолит) и хлорит-4 (брунсвигит) (см. рис. 3б) присутствуют в виде включений в роговой обманке. Хлориты в амфиболе ассоциируют с калиевым полевым шпатом, эпидотом и альбитом. Они характеризуются высокими значениями X (Fe) — 0.60–0.97. Температура образования рипидолита, полученная с помощью геотермометрии [Cathelineau, 1988] составляет 330–364 °С, брунсвигита — 292–310 °С (табл. 1). В обеих разновидностях хлорита  $Al^{IV}$  обычно преобладает над  $Al^{VI}$ . Однако в отдельных анализах они имеют равные количества, что указывает на более высокую температуру их образования по сравнению с хлоритом-1 и хлоритом-2.

Хлориты в метасоматически измененных дайках, не содержащих золотоносную сульфидную минерализацию, относятся к магнезиальной, магнезиально-железистой и железистой разновидностям триоктаэдрического состава (I-тип) (рис. 4а). Брунсвигит и рипидолит попадают в область Fe-хлорита, тогда как пеннин и клинохлор — в область Mg-хлорита (см. рис. 4а).

Химический состав хлорита в метасоматически измененных дайках, содержащих золотоносную сульфидную минерализацию, исследован в трех образцах: 5–12/1, 7–12/1 и 10–18/1.

**Образец 5–12/1** характеризует метасоматически измененное роговообманковое габбро с вкрапленностью сульфидов (рис. 5а). По химическому составу здесь выделяются две разновидности хлорита (см. рис. 2б). Первая из них представлена рипидолитом (Si от 5.51 до 5.66 а.ф.е.,  $Al^{IV}$  от 2.40 до 2.49 а.ф.е.,  $Al^{VI}$  от 2.34 до 2.57 а.ф.е., Fe от 3.46 до 4.07 а.ф.е., Mg от 5.25 до 5.88 а.ф.е., X (Fe) от 0.37 до 0.44,  $Al_2O_3$  от 19.12–20.96 мас. %), а вторая —



**Рис. 3. Фотографии метасоматических минералов безрудных пропицитов (образец 35–17) в обратно рассеянных электронах**

Условные обозначения: а — хлорит, замещающий амфибол (Mg-Fe роговую обманку); б — хлорит во включениях роговой обманки в ассоциации с калиевым полевым шпатом, эпидотом, альбитом. amf — амфибол, chl — хлорит, ep — эпидот, ab — альбит, кпш — калиевый полевой шпат.

**Fig. 3. Backscattered electron photographs of metasomatic minerals in barren propylite (sample 35–17)**

Legend: а — chlorite replacing amphibole (Mg-Fe hornblende); б — chlorite in hornblende inclusions in association with potassium feldspar, epidote, and albite. amf — amphibole, chl — chlorite, ep — epidote, ab — albite, кпш — potassium feldspar.

пикнохлоритом (Si 5.66–6.17 а.ф.е., Al<sup>IV</sup> 1.83–2.34 а.ф.е., Fe 3.15–4.64 а.ф.е., Mg 4.84–6.25 а.ф.е., X (Fe) 0.34–0.49). Обе разновидности хлорита содержат примесь S (до 0.48 мас. % SO<sub>3</sub>). Хлориты в ассоциации с сульфидами характеризуются низкими содержаниями FeO (19.00–23.79 мас. %).

В пикнохлорите в незначительных количествах присутствуют также K и Ca.

Как видно на диаграмме (см. рис. 2б), значение Fe/ (Fe+Mg) и Si в хлорите обоих типов свя-

зано между собой обратной корреляционной зависимостью.

Рассмотренные хлориты относятся к магнезиальной разновидности триоктаэдрического состава (I-тип) (см. рис. 4б) [Zane, Weiss, 1998; Bailey, 1988]. Данные по составу показывают, что они имеют значения Fe/ (Fe+Mg) < 0.5. Температура образования хлоритов составляет 290–340 °С.

**Образец 10–18/1** характеризует метасоматически измененную рудоносную дайку диоритов.

**Таблица 1. Химический состав (мас. %) хлорита безрудных пропилитов и его кристаллохимические характеристики**  
**Table 1. Chemical composition (wt. %) of chlorite from barren propylites and its crystallochemical characteristics**

Компонент	Chl-1 (пеннин)	Chl-2 (клинохлор)	Chl-3 (рипидолит)	Chl-4 (брунсвит)
SiO <sub>2</sub>	33.01	30.59–21.32	23.42–25.12	24.49–25.72
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.48	17.66–18.28	18.34–19.03	15.40–19.70
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-
FeO	11.39	14.65–15.33	30.12–47.50	42.15–46.83
MnO	0.71	0.84–0.94	0.33–0.47	0.41–0.46
MgO	27.59	23.65–24.30	2.05–11.36	0.87–3.85
CaO	0.5	0.18–0.37	0.12–0.32	0.17–0.39
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	-	-	0.09–0.13
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0–0.18	-
Сумма	89.68	88.41–89.51	85.39–90.47	89.16–90.01
Si	6.32	6.03–6.16	5.35–5.56	5.69–5.80
Ti	-	-	-	-
Al	3.72	4.09–4.22	4.73–5.13	4.11–5.14
Cr	—	—	—	—
Fe <sup>3+</sup>	—	—	0.11–0.52	0–0.34
Fe <sup>2+</sup>	1.82	2.41–2.55	5.64–8.71	7.79–9.23
Mn	0.12	0.14–0.16	0.006–0.09	0.08–0.09
Mg	7.87	7.01–7.11	0.76–3.79	0.31–1.29
Ca	0.15	0.04–0.08	0.03–0.08	0.04–0.08
Na	-	-	-	-
K	-	-	-	0–0.02
V	-	-	0.02	-
Al <sup>IV</sup>	1.68	1.84–1.97	2.44–2.65	2.20–2.31
Al <sup>VI</sup>	2.04	2.22–2.26	2.11–2.48	1.90–2.83
X (Mg)	0.80	0.72–0.73	0.08–0.40	0.03–0.14
sumFe	1.82	2.41–2.55	5.64–8.82	7.79–9.23
X (Fe)	0.19	0.25–0.27	0.60–0.93	0.86–0.97
T, °C	208	237–257	330–364	292–310

Примечание. Здесь и в табл. 2: X (Mg) — коэффициент магнезиальности (Mg/ (Fe<sup>2+</sup>+Mg)); X (Fe) — коэффициент железистости Fe/ (Fe+Mg). Температура рассчитана по хлоритовым геотермометрам [Cathelineau, 1988]. Прочерк — не обнаружено.

Note. Here and in Table 2: X (Mg) — coefficient of magnesia (Mg/ (Fe<sup>2+</sup>+Mg)); Fe/ (Fe+Mg) — coefficient of iron content. The temperature is calculated using chlorite geothermometry [Cathelineau, 1988]. Dash — not detected.

**Таблица 2. Химический состав (мас. %) хлорита рудоносных пропилитов и его кристаллохимические характеристики**  
**Table 2. Chemical composition (wt. %) of chlorite of ore-bearing propylites and its crystallochemical characteristics**

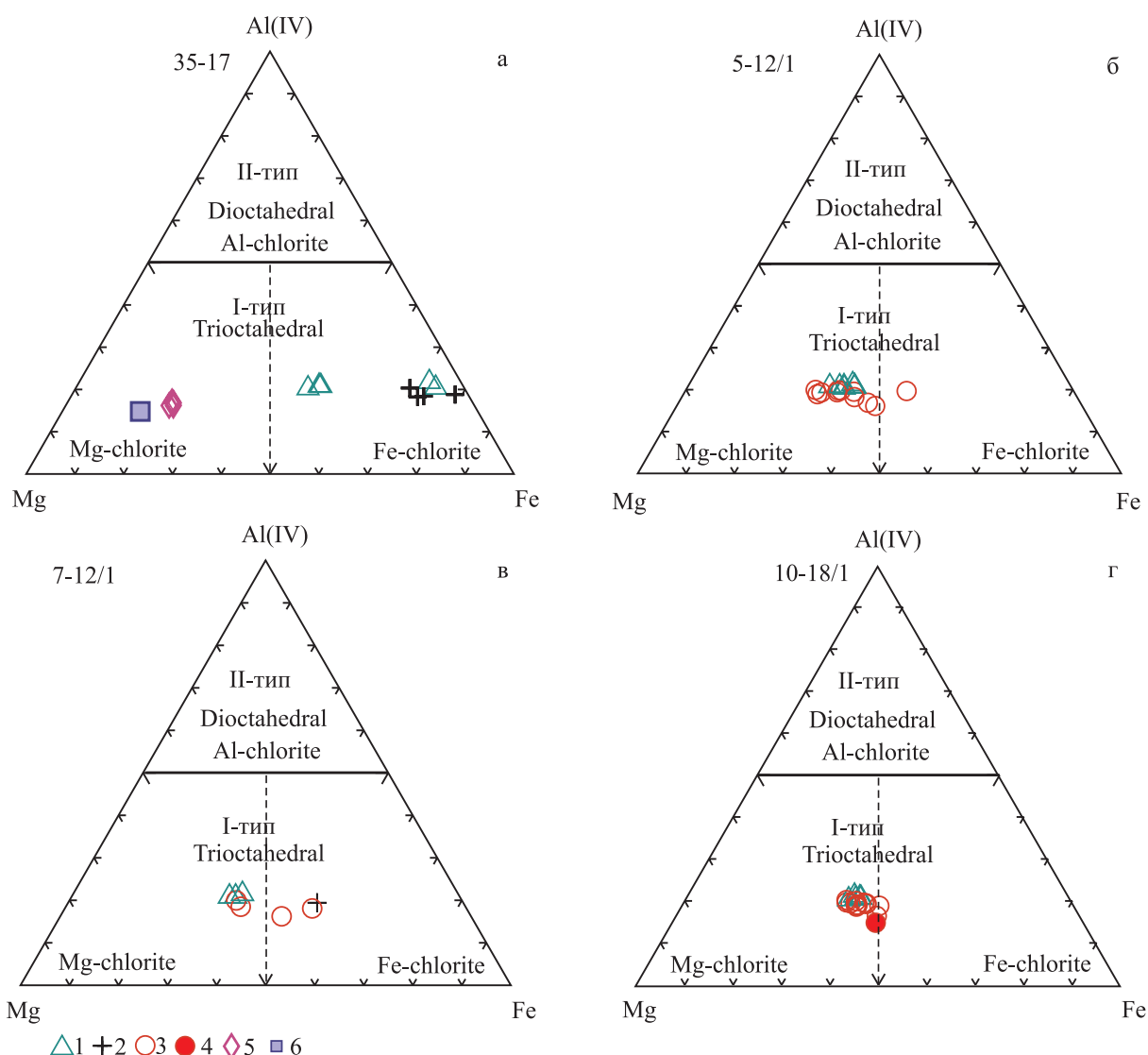
Образец	5-12/1		7-12/1			10-18/1		
	Рипидолит	Пикнохлорит	Рипидолит	Брунсвит	Пикнохлорит	Рипидолит	Пикнохлорит	Диабантит
SiO <sub>2</sub>	25.67–27.36	26.08–29.73	26.18–28.96	25.57	26.93–29.18	25.25–26.93	24.33–28.34	29.17–33.39
TiO <sub>2</sub>	0–0.64	0–0.83	0–0.13	-	0–0.62	0–0.33	-	0–0.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.12–20.96	17.29–20.59	20.67–22.10	17.99	16.59–20.11	19.07–20.19	16.58–19.68	13.78–15.71
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0–0.18	0–0.29	-	-	0.15–0.31	-	-	0–0.16
FeO	20.41–22.84	19.0–26.76	23.61–24.56	31.15	23.54–30.57	22.75–24.59	20.59–27.59	25.74–27.04
MnO	0.48–0.64	0.21–0.58	0.55–0.60	0.26	0.29–0.48	0.34–0.40	0.34–0.41	0.23–0.25
MgO	16.37–19.43	15.64–21.16	16.96–19.26	10.25	10.69–18.79	15.72–17.45	14.97–17.89	13.56–14.85
CaO	0.2–0.39	0.13–0.50	0.1–0.24	0.38	0.18–0.44	0–0.15	0.08–0.47	0–0.28
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	0–0.30	-	-	0–0.21	-	-	0–0.07
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	83.69	-	-	-	-	0–0.13	-	0–0.17
Сумма	5.51–5.66	83.85–90.31	95.06–95.46	86.09	83.19–95.46	84.37–88.92	86.62–88.92	86.14–88.80
Si	0–0.10	5.66–6.09	5.44–5.56	5.76	5.65–6.15	5.54–5.56	5.61–6.12	6.35–7.17
Ti	4.76–5.01	0–0.13	0–0.02	-	0–0.10	0. — 0.05	0–0.04	0–0.09
Al	0–0.3	4.23–4.86	4.99–5.06	4.78	4.12–4.73	4.82–5.05	4.22–4.80	3.49–4.03
Cr	0–0.22	0–0.65	-	-	0–0.05	-	-	0–0.03
Fe <sup>3+</sup>	3.46–4.07	-	0–0.06	-	-	0–0.05	-	-
Fe <sup>2+</sup>	0.09–0.11	3.15–4.64	3.78–4.07	5.86	4.0–5.65	4.11–4.29	3.94–4.80	4.68–4.85
Mn	5.25–5.88	0.04–0.10	0.09–0.10	0.07	0.05–0.08	0.06–0.07	0.05–0.08	0.04–0.05
Mg	0–0.09	4.84–6.25	5.25–5.51	3.44	3.53–5.41	5.15–5.29	4.76–5.57	4.34–4.81
Ca	-	0.03–0.12	0.02–0.05	0.09	0.04–0.06	0–0.03	0.02–0.11	0–0.07
Na	-	-	-	-	-	-	-	-
K	-	0–0.4	-	-	0.01–0.03	-	-	-
V	-	-	-	-	-	0–0.01	-	0–0.01
Al <sup>IV</sup>	2.40–2.49	1.83–2.34	2.44–2.56	2.24	1.85–2.35	2.41–2.53	1.88–2.39	0.83–1.65
Al <sup>VI</sup>	2.34–2.57	2.40–2.64	2.50–2.56	2.54	2.28–2.64	2.43–2.53	2.28–2.41	2.38–2.66
X (Mg)	0.56–0.62	0.51–0.66	0.56–0.57	0.37	0.38–0.57	0.54–0.56	0.49–0.58	0.47–0.50
sumFe	3.46–4.07	3.15–4.64	3.78–4.13	5.86	4.0–5.65	4.11–4.29	3.94–4.80	4.68–4.85
X (Fe)	0.37–0.44	0.34–0.47	0.41–0.44	0.63	0.42–0.62	0.44–0.45	0.42–0.50	0.49–0.53
T, °C	324–340	232–314	330–350	298	235–315	331–334	240–323	204

По данным электронно-микроскопического анализа хлорит в данном образце представлен рипидолитом, пикнохлоритом и диабантитом.

Рипидолит, замещающий амфибол (Mg-Fe роговую обманку), характеризуется высокими значениями Al<sup>IV</sup> (до 2.41–2.53 а.ф.е.) и Mg (до 5.15–5.45 а.ф.е.). Содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в рипидолите варьиру-

ет от 19.07 до 20.19 мас. %, количество Al<sup>VI</sup> ≥ Al<sup>IV</sup>. Коэффициенты магнезиальности X (Mg) и железистости X (Fe) составляют 0.54–0.56 и 0.44–0.45, соответственно.

Пикнохлорит имеет следующий состав (а. ф. е.): Si (5.61–6.12), Al<sup>IV</sup> (1.88–2.39), Al<sup>VI</sup> (2.28–2.41), Mg (4.76–5.57), Fe (3.94–4.80), примеси K,



**Рис. 4.** Состав хлорита безрудных (а) и рудоносных (в-г) пропилов на диаграмме  $Mg - Al^{IV} - Fe$  (по коэффициентам в формуле) [Zane, Weiss, 1998]

Условные обозначения: I-тип — Mg-хлориты и Fe-хлориты. Хлориты II-типа — Al-хлориты [Zane, Weiss, 1998]. Условные обозначения см. рис. 2.

**Fig. 4.** The composition of chlorite in the diagram  $Mg - Al^{IV} - Fe$  (by coefficients in the formula) [Zane, Weiss, 1998]

Legend: I-type — Mg-chlorites and Fe-chlorites. Type II chlorites — Al-chlorites [Zane, Weiss, 1998]. For legend see fig. 2.

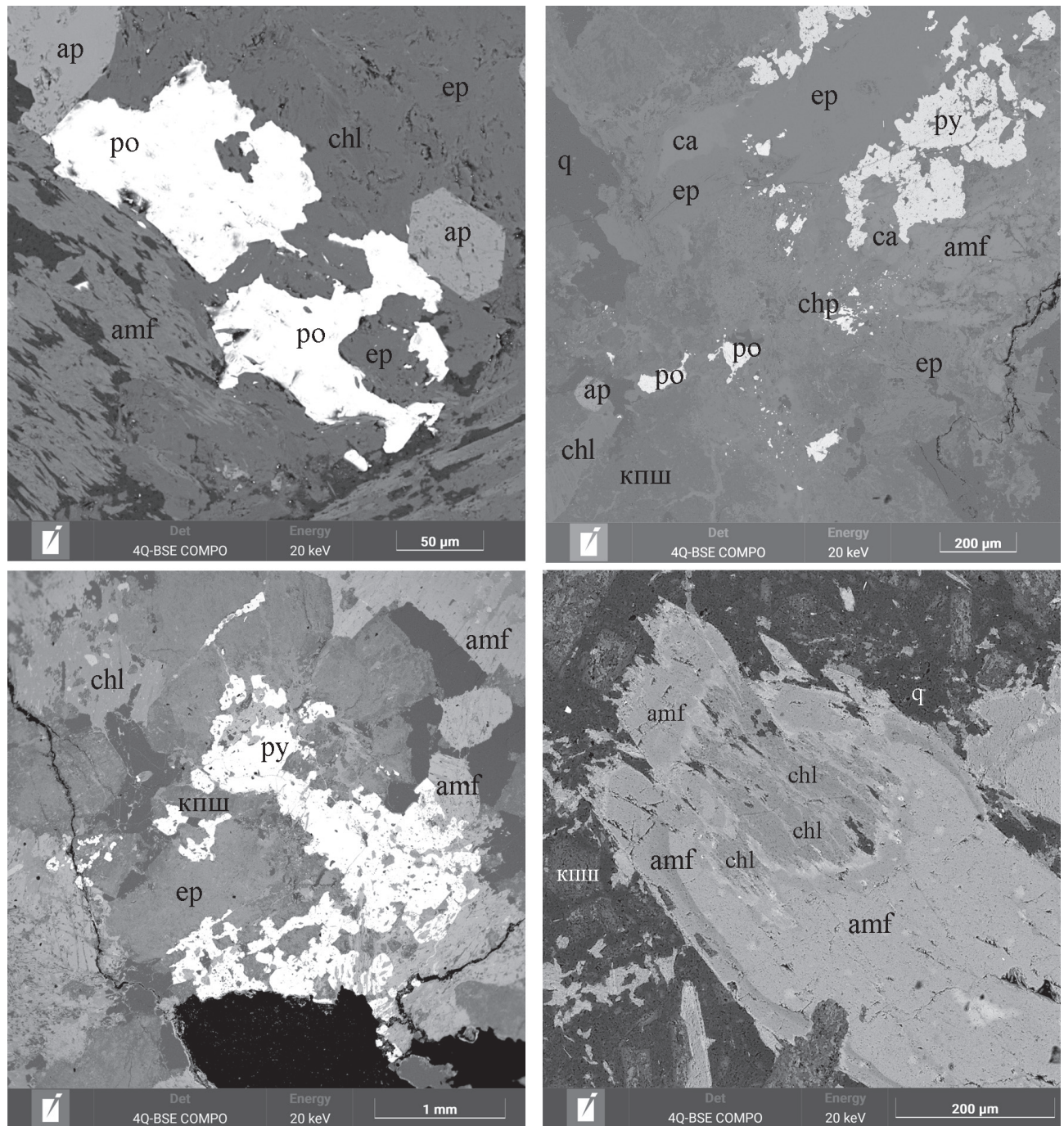
Ti, V, Mn. Он характеризуется переменной железистостью  $X(Fe) = 0.42-0.50$  и магнезиальностью  $X(Mg) = 0.49-0.58$ . Содержание  $Al_2O_3$  варьирует от 16.58 до 19.68 мас. %, при этом  $Al^{VI} \geq Al^{IV}$ . Пикнохлорит ассоциирует с альбитом, калиевым полевым шпатом, эпидотом, апатитом и кварцем.

Для диабантита коэффициент  $X(Fe) = 0.49-0.53$  и  $X(Mg) = 0.47-0.50$ . Содержание  $Al_2O_3$  ниже, чем в пикнохлорите, и составляет 13.78–15.71 мас. %. Количество  $Al^{VI}$  преобладает над  $Al^{IV}$ ,

характеризуя слабокислую среду минералообразования.

Все разновидности хлорита не содержат серу. На диаграмме  $Mg - Al^{IV} - Fe$  [Zane, Weiss, 1998] точки состава хлорита попадают в поле магнезиального I-типа (см. рис. 4 г).

Температура кристаллизации хлоритов меняется от 345 до 204 °С. Наиболее высокая температура характерна для рипидолита. Она составляет 326–345 °С. Для пикнохлорита температура образования находится в широком интервале 323–



**Рис. 5. Фотографии метасоматических минералов рудоносных пропилитов (образец 5–12/1 и 7–12/1) в обратно рассеянных электронах**

Условные обозначения: py — пирит, po — пирротин, chp — халькопирит, amf — амфибол, chl — хлорит, ep — эпидот, кпш — калиевый полевой шпат, ap — апатит, ca — кальцит, q — кварц.

**Fig. 5. Backscattered electron photographs of metasomatic minerals in ore-bearing propylites (samples 5–12/1 and 7–12/1)**

Legend: py — pyrite, po — pyrrhotite, chp — chalcopyrite, amf — amphibole, chl — chlorite, ep — epidote, кпш — potassium feldspar, ap — apatite, ca — calcite, q — quartz.

240 °С. Наиболее поздний хлорит (диабантит) образовался при температуре 204 °С.

**Образец 7–12/1** отобран из метасоматически слабо измененной рудоносной дайки габбро-диорита. По химическому составу хлорит разделяется на рипидолит, брунсвит и пикнохлорит (см. рис. 2в).

Рипидолит, образующий тесные сростания с плагиоклазом, эпидотом, пиритом и халькопиритом, существенно обогащен алюминием, содержание которого может достигать  $Al_{tot}$  4.99–5.06 а.ф.е. Для него характерно превышение  $Al^{VI}$  над  $Al^{IV}$ . Содержание Si варьирует от 5.44–5.56 а.ф.е.,  $Al^{IV}$  2.44–2.56 а.ф.е. Коэффициент магнезиальности X (Mg) составляет 0.56–0.57 при содержании Mg = 5.256–5.51 а.ф.е. Он обеднен Fe 3.78–4.13 а.ф.е. Коэффициент железистости X (Fe) равен 0.41–0.44.

Брунсвит в отличие от рипидолита обогащен Si (5.76 а.ф.е.),  $SO_3$  (0.39 мас. %) и Fe (5.86 а.ф.е.), коэффициент железистости первого составляет 0.63. Он имеет низкую магнезиальность ( $X(Mg) = 0.37$ ). Содержание  $Al_2O_3$  (17.99 мас. %) в брунсвите ниже, чем в рипидолите. Количество  $Al^{VI}$  (2.54–2.64 а.ф.е.) превышает количество  $Al^{IV}$  (2.03–2.24 а.ф.е.).

Пикнохлорит характеризуется широкими вариациями коэффициента железистости и магнезиальности: X (Fe) от 0.42 до 0.62, X (Mg) от 0.38 до 0.57. Содержание  $Al_2O_3$  колеблется в интервале от 16.59 до 20.11 мас. %. Количество алюминия в октаэдрической координации ( $Al^{VI}$  2.28–2.64 а.ф.е.) преобладает над алюминием четверной позиции ( $Al^{IV}$  1.85–2.35 а.ф.е.). Для пикнохлорита характерна примесь серы (0.16–0.26 мас. %  $SO_3$ ).

На классификационной диаграмме Mg —  $Al^{IV}$  — Fe [Zane, Weiss, 1998; Bailey, 1988] точки составов рипидолита, брунсвита и пикнохлорита попадают в поле I-типа магнезиально-железистой разновидности триоктаэдрического состава (см. рис. 4в).

По данным геотермометра [Cathelineau, 1988] температура образования хлоритов варьирует от 350 до 235 °С. Диапазон высоких значений температуры (330–350 °С) соответствует кристаллизации рипидолита. Пикнохлориту характерен температурный интервал от 235 до 315 °С, брунсвиту — 265–298 °С.

Таким образом, метасоматически измененные рудоносные дайки габбро, габбро-диоритов и диоритов имеют почти схожий химический состав высокотемпературных хлоритов — рипидолита и пикнохлорита. Лишь вблизи сульфидных минералов хлорит обеднен Fe по сравнению с хлоритом, расположенным на удалении от сульфидов. Аналогичная картина наблюдается для хлоритов

из метасоматитов Кутуевского Au-Cu-порфирового рудопроявления (Южный Урал) и из кварц-серицитовых метасоматитов Au-Mo-Cu месторождения Песчанка (Чукотка) [Знаменский, Знаменская, 2025; Марущенко и др., 2015].

Брунсвит обнаружен в метасоматически измененной рудоносной дайке габбро-диорита. Наиболее поздний хлорит — диабантит выявлен только в метасоматически измененной рудоносной дайке диоритов. Хлорит из этих даек в отличие от хлоритов рудоносных пропилитов не содержит серу.

## Обсуждение

По результатам выполненных исследований в составе пропилитов Карагайкульского рудопроявления установлено несколько разновидностей хлорита (рипидолит, брунсвит, пикнохлорит, диабантит), которые различаются между собой содержанием  $Si^{IV}$ , Al, значениями коэффициентов железистости Fe/ (Fe+Mg) и магнезиальности X (Mg), а также температурой кристаллизации.

В безрудных пропилитах хлорит представлен рипидолитом, брунсвитом, клинохлором и пеннином. Температура образования рипидолита по хлоритовому геотермометру [Cathelineau, 1988] оценивается в 330–364 °С, брунсвита — в 292–294 °С, клинохлора — в 234–254 °С, пеннина — в 208 °С.

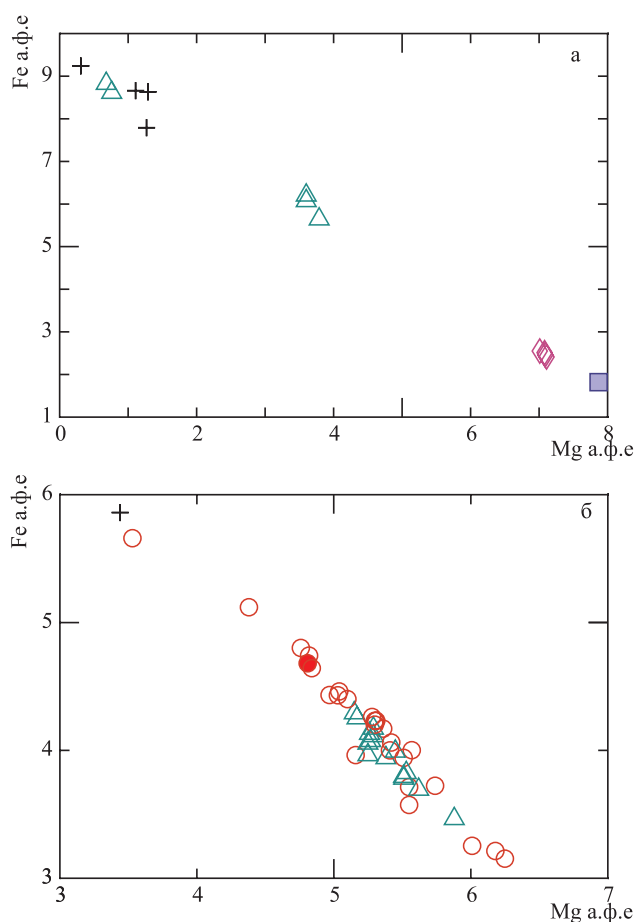
Хлорит рудоносных пропилитов отвечает рипидолиту, пикнохлориту и диабантиту, которые кристаллизовались при температуре 204–350 °С.

Среди хлоритов безрудных и рудоносных пропилитов доминирует высокотемпературный рипидолит, который характеризуется высокими значениями алюминия в четверной координации. Рипидолит безрудных пропилитов более железистый ( $X(Fe) = 0.60–0.93$ ) по сравнению с рипидолитом рудоносных пропилитов ( $X(Fe) = 0.37–0.45$ ).

По нашим наблюдениям, в рудоносных пропилитах кристаллизация рипидолита происходила близодновременно с отложением сульфидов. В условиях высокой активности сульфидной серы во флюиде Fe концентрировалось преимущественно в сульфидах [Inoue, 1995; Марущенко и др., 2015]. После завершения рудных процессов, что, скорее всего, было связано с падением активности сульфидной серы, сформировались пикнохлорит и диабантит, характеризующиеся по сравнению с рипидолитом более высокой  $X(Fe) > 0.5$ . Подобные процессы ранее были описаны В. Л. Русиновым [1989] для эпиптермальных месторождений Средней Азии.

По содержаниям  $R^{VI}$  (5.99–6.0 к. ф.) и  $[R^{3+}]^{VI}$  (1.02–1.41 к. ф.) хлорит во всех изученных образцах относится к триоктаэдрической группе, что соответствует химической формуле триоктаэдрических хлоритов —  $(R^{2+}, R^{3+})_6 (Si_{4-x} Al_x) O_{10} (OH)_8$  [Bailey, 1988], где двухвалентные катионы представлены Mg и  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , а трехвалентные —  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ . На классификационной диаграмме Mg —  $Al^{IV}$  — Fe [Zane, Weiss, 1998] все точки составов хлорита попадают в поле железо-магнезиального триоктаэдрического I-типа (см. рис. 4).

В хлорите возможны три механизма изоморфного замещения элементов (катионов): 1)  $Fe^{2+} \leftrightarrow Mg$ , 2) чермакитовый  $Al^{IV}Al^{VI} = Si + (Mg, Fe^{2+})$  и 3) ди- и триоктаэдрический [Hillier, Velde, 1991; Vidal et al., 2001; Bourdelle et al., 2013].



**Рис. 6.** Соотношение катионов Mg и Fe в хлорите в октаэдрической позиции безрудных (а) и рудоносных пропилитов (б) Карагайкульского рудопроявления. Условные обозначения см. рис. 2.

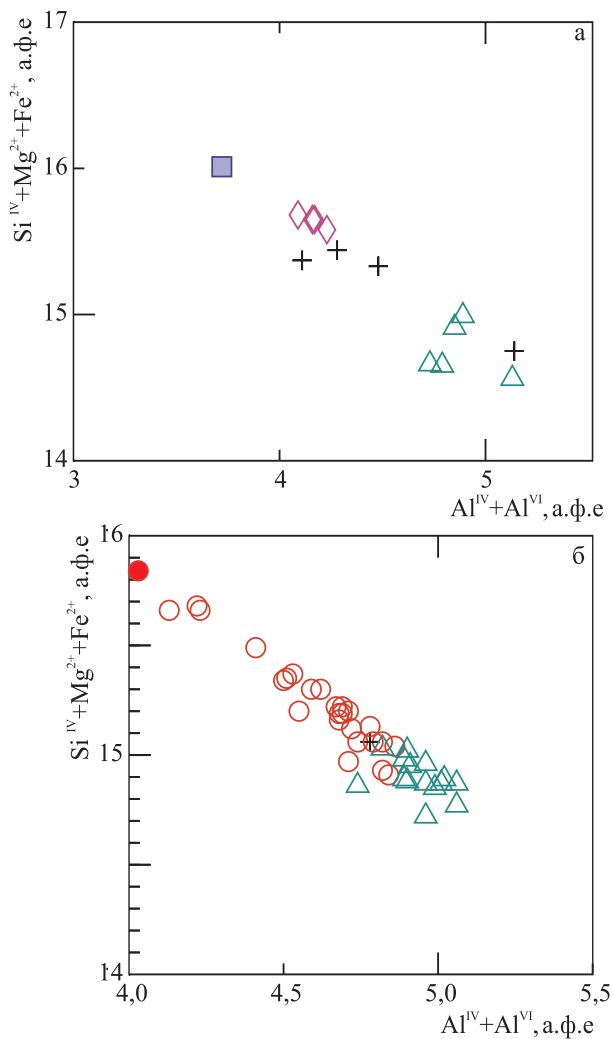
**Fig. 6.** Mg and Fe cation ratios in octahedral substitutional chlorite of barren (a) and ore-bearing propylites (б) of the Karagaykul ore occurrence

For legend, see fig. 2

Железистость и магниальность хлорита зависят от состава пород, температуры их образования и состава, ассоциирующихся с ними минералов Fe [Пузанков и др., 2010; Лупак, 2012; Шардакова и др., 2023].

Обратная корреляционная зависимость между  $Fe^{2+}$  и Mg (рис. 6) указывает на то, что основным механизмом изоморфного замещения катионов в хлорите было  $Fe^{2+} \leftrightarrow Mg$ .

Помимо изоморфного замещения  $Fe^{2+} \leftrightarrow Mg$  в хлорите наблюдается чермакитовое замещение, влияющее на химизм как в октаэдрических, так

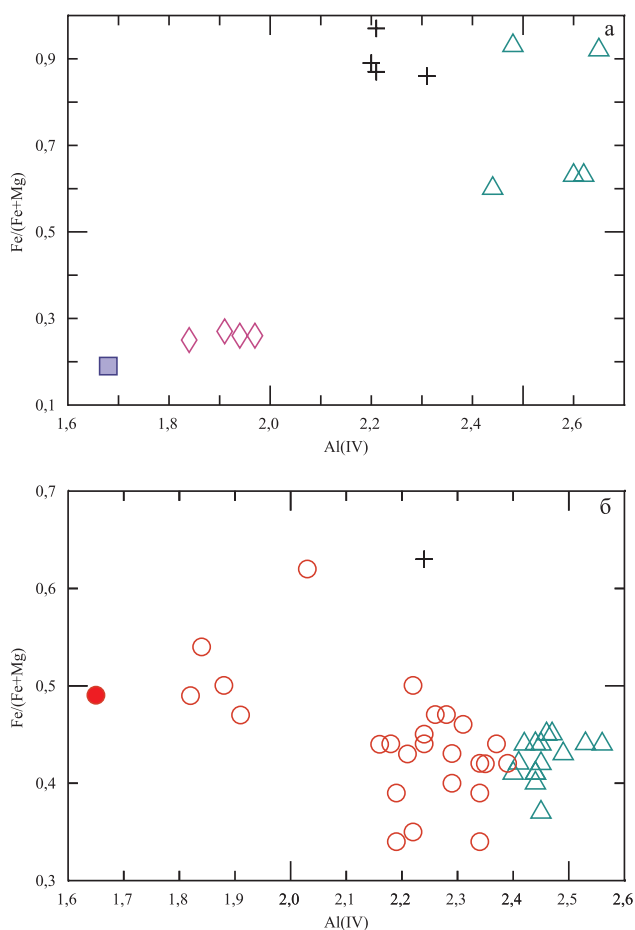


**Рис. 7.** Соотношение  $Si^{IV}+(Mg+Fe)^{2+}$  и  $Al^{IV}+Al^{VI}$  в хлорите безрудных (а) и рудоносных пропилитов (б) Карагайкульского рудопроявления. Условные обозначения см. рис. 2.

**Fig. 7.** The ratio of  $Si^{IV}+(Mg+Fe)^{2+}$  and  $Al^{IV}+Al^{VI}$  in chlorite of barren (a) and ore-bearing propylites (б) of the Karagaykul ore occurrence

For legend, see fig. 2.

и тетраэдрических позициях, выраженное отрицательной корреляцией между значениями Al и Si + (Mg<sup>2+</sup> + Fe<sup>2+</sup>) (рис. 7). Степень чермакитового замещения зависит от температуры, высокие значения которой способствуют вхождению алюминия в тетраэдрические позиции, вытесняя кремний. Величина Al<sup>IV</sup> служит индикатором физико-химических температурных условий формирования хлорита [Cathelineau, 1988 и др.]. При падении температуры процесс чермакитового замещения идет в обратную сторону, доля его уменьшается, что проявляется ростом содержания Si и снижением общего содержания Al, особенно заметно уменьшение алюминия в четверной координации (Al<sup>IV</sup>) (рис. 8).



**Рис. 8.** Соотношение Fe/(Fe+Mg) и Al<sup>IV</sup> в хлорите безрудных (а) и рудоносных пропилитов (б) Карагайкульского рудопроявления

Условные обозначения см. рис. 2.

**Fig. 8.** Fe/(Fe+Mg) and Al<sup>IV</sup> ratios in chlorite from barren (a) and ore-bearing propylites (b) of the Karagaykul ore occurrence

For legend, see fig. 2.

В хлорите безрудных пропилитов намечается умеренная положительная корреляция ( $r = 0.72$ ) между значениями Al<sup>IV</sup> и Fe/ (Fe+Mg) (см. рис. 8), что связано с влиянием температуры и состава флюида на замещение Mg $\leftrightarrow$ Fe<sup>2+</sup>. По данным [Kranidiotis, MacLean, 1987], величина отношения Fe/(Fe+Mg) имеет положительную корреляцию с температурой образования хлорита. Результаты наших исследований согласуются с этими данными. Низкожелезистые хлориты рудопроявления с Fe/ (Fe+Mg) < 0.3 обеднены Al<sup>IV</sup> по сравнению с хлоритами, у которых Fe/ (Fe+Mg) > 0.5. Изменение состава хлорита безрудных пропилитов от рипидолита к пеннину обусловлено падением температуры (от 364 до 208 °С), снижением значений X (Fe) и Al<sup>IV</sup> и увеличением Mg, Si, Mn.

Иной тренд имеет хлорит рудоносных пропилитов. Положительная линейная корреляция между значениями Al<sup>IV</sup> и Fe/ (Fe+Mg) в хлорите рудоносных пропилитов не наблюдается (см. рис. 8). Отсутствие данной зависимости указывает на то, что температура образования хлоритов не влияет на железистость и изоморфное замещение Fe<sup>2+</sup> $\leftrightarrow$ Mg протекало независимо от неё. По всей вероятности, изменение состава хлоритов рудоносных пропилитов от рипидолита к пикнохлориту/диабантиту связано также с изменением состава флюида, а именно со снижением активности сульфидной серы.

Таким образом, изменение состава хлорита в рудоносных пропилитах от менее железистых к более железистым разновидностям (от рипидолита к диабантиту), кроме температуры, определяется составом минералообразующего флюида, по-видимому, активностью в нем сульфидной серы.

Переход железистых к менее железистым разновидностям хлорита (от рипидолита к пеннину) безрудных пропилитов, в основном, контролируется температурой и составом минералообразующего флюида.

Хлорит пропилитов, кристаллизовавшийся в интервале температур 204–350 °С соответствует диапазону температур образования пропилитов биотит-актинолитовой, эпидот-хлоритовой и альбит-хлорит-кальцитовой фациям [Метасоматизм..., 1998, Граменицкий, 2012].

## Заклучение

В результате исследований установлено, что хлорит в безрудных и рудоносных пропилитах Карагайкульского рудопроявления относится к рипидолиту, пикнохлориту, брунсвигиту,

диабантиту, клинохлору и пеннину. Формирование их происходило в мезотермальных условиях в интервале температур 364–204 °С.

Основной механизм изоморфного замещения в структуре хлорита, который контролировал изменения состава хлорита от рипидолита к пеннину/диабантиту, представлен замещением  $Mg^{2+} \leftrightarrow Fe^{2+}$  в октаэдрических слоях. Помимо простого изоморфного замещения в хлоритах установлено гетеровалентное чермакитовое замещение с уменьшением его доли в хлорите безрудных (пеннин) и рудоносных (диабантит) пропилитов.

В пропилитах изменение состава хлорита контролировалась температурой и составом минералообразующего флюида. В безрудных пропилитах температура играла важную роль при замещении  $Fe^{2+} \leftrightarrow Mg$  в хлоритах. В рудоносных пропилитах на изменение состава хлорита, кроме температуры оказывало влияние активность сульфидной серы.

Полученные с помощью хлоритового геотермометра значения температур кристаллизации пропилитов Карагайкульского рудопоя соответствует диапазону температур образования пропилитов биотит-актинолитовой, эпидот-хлоритовой и альбит-хлорит-кальцитовой фации.

## Список литературы

*Арутюнян М. А.* Характер проявления предрудной пропилитизации в диорит-порфиридах Каджаранского рудного поля // Известия Национальной академии наук Республики Армения. Науки о Земле. 2008. Т. LXI. № 2. С. 29–34.

*Грабежьев А. И., Белгородский Е. А.* Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфировых месторождений. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1992. 199 с.

*Граменицкий Е. Н.* Петрология метасоматических пород. М.: Инфра-М, 2012. 221 с.

*Знаменский С. Е.* Позитивная цветочная структура Яльчигуловского разлома на Южном Урале // Геологический вестник. 2019. № 2. С. 24–31. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-2-2>

*Знаменский С. Е.* Петролого-геохимические характеристики пород Вознесенского интрузивного массива (Южный Урал): к вопросу о составе и источниках магм, продуцирующих золото- и медно-порфировое оруденение // Литосфера. 2021. № 3. С. 365–385. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-3-365-385>

*Знаменский С. Е., Знаменская Н. М.* Минералогия околорудных метасоматитов Кутуевского Au-Cu-порфирового рудопоя (Южный Урал) // Вестник академии наук Республики Башкортостан. 2025. Т. 56. № 3 (119). С. 68–77. <https://doi.org/10.24412/1728-5283-2025-3-68-77>

*Знаменский С. Е., Косарев А. М., Шафигуллина Г. Т.* Карагайкульское золото-порфировое рудопоявление (Южный Урал): геохимия и петрогенезис интрузивных

пород, состав минералов околорудных метасоматитов и руд // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 3. С. 187–196. <https://doi.org/https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.16>

*Косарев А. М., Пучков В. Н., Ронкин Ю. Л., Серавкин И. Б., Холоднов В. В., Грабежьев А. И.* Новые данные о возрасте и геодинамической позиции медно-порфировых проявлений зоны Главного уральского разлома на Южном Урале // Доклады Академии наук. 2014. Т. 459. № 1. С. 62–66. <https://doi.org/10.7868/S0869565214310193>

*Лунак Е. М.* Типоморфизм хлоритов Сухаринского рудного поля // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 1. С. 52–55.

*Марущенко Л. И., Бакшеев И. А., Нагорная Е. В., Чисталин А. Ф., Николаев Ю. Н., Калько И. А., Прокофьев В. Ю.* Кварц-серицитовые метасоматиты и аргиллизиты Au-Mo-Cu месторождения Песчанка (Чукотка) // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 3. С. 239–252. <https://doi.org/10.7868/s001677701503003x>

Метасоматизм и метасоматические породы // Под ред. В. А. Жарикова. М.: Научный мир, 1998. 492 с.

*Пузанков И. М., Косоруков В. Л., Округин В. М., Филофова Т. М.* Хлориты метасоматитов Родникового золото-серебряного месторождения (Южная Камчатка) // Материалы IX региональной молодежной научной конференции. Природная среда Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2010. С. 89–96.

*Русинов В. Л.* Метасоматические процессы в вулканических толщах. М.: Наука, 1989. 214 с.

*Шардакова Г. Ю., Коровко А. В., Антонишин Н. А.* Условия образования и преобразования, особенности флюидного режима рудно-магматической системы Южно-Сарышаганской гранитной интрузии (Западное Прибалхашье) // Литосфера. 2023. Т. 23. № 5. С. 717–739. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-887-909>

Bailey S. W. Chapter 10. Chlorites: structures and crystal chemistry / Hydrous Phyllosilicates, 1988. P. 347–404. <https://doi.org/10.1515/9781501508998-015>

*Bourdelle F., Parra T., Chopin C., Beyssac O.* A new chlorite geothermometer for diagenetic to low-grade metamorphic conditions // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2013. V. 165. No. 4. P. 723–735. <https://doi.org/10.1007/s00410-012-0832-7>

*Cathelineau M.* Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature // Clay Minerals. 1988. V. 23. No. 4. P. 471–485. <https://doi.org/10.1180/claymin.1988.023.4.13>

*Hey M. H.* A new review of the chlorites // Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society. 1954. V. 30. No. 224 P. 277–292. <https://doi.org/10.1180/minmag.1954.030.224.01>

*Hillier S., Velde B.* Octahedral occupancy and chemical composition of diagenetic (low-temperature) chlorites // Clay Minerals. 1991. V. 26. No. 2. P. 149–168. <https://doi.org/10.1180/claymin.1991.026.2.01>

*Inoue A.* Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments // Origin and Mineralogy of Clays, Springer Berlin Heidelberg, 1995. P. 268–329. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-12648-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-12648-6_7)

*Kranidiotis P., MacLean W. H.* Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit,

Matagami, Quebec // *Economic Geology*. 1987. V. 82. No. 7. P. 1898–1911. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.7.1898>

Zane A., Weiss Z. A procedure for classifying rock forming chlorites based on microprobe data // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 1998. V. 9. P. 51–56.

Vidal O., Parra T., Trotet F. A thermodynamic model for Fe-Mg aluminous chlorite using data from phase equilibrium experiments and natural pelitic assemblages in the 100–600 °C and 1–25 Kbar range // *American Journal of Sciences*. 2001. V. 301. No. 6. P. 557–592. <https://doi.org/10.2475/ajs.301.6.557>

## References

Arutyunyan M. A. (2008) The Character of preore propylitization occurrence diorite-porphyrates of the Kajaran ore field. *Izvestiya of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia. Nauki o Zemle*. LXI (2), 29–34 (In Russian).

Grabezhev A. I., Belgorodskii E. A. (1992) Ore-bearing granitoids and metasomatites of copper porphyry deposits. Yekaterinburg, IGG UrO RAN. 199. p. (In Russian).

Gramenitsky E. N. (2012) Petrology of metasomatic rocks. Moscow: Infra-M Publ. 221. p. (In Russian).

Znamensky S. E. (2019) The positive flower structure of the Yalchigulovsky fault in the Southern Urals. *Geologicheskii vestnik*. (2), 24–31. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-2-2> (In Russian).

Znamensky S. E. (2021) Petrological and geochemical characteristic of the rocks of the Voznesensky intrusive massif (Southern Urals): On the question of the composition and sources of magma producing gold and copper porphyry mineralization. *Lithosphere*. (3), 365–385. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-3-365-385> (In Russian).

Znamensky S. E., Znamenskaya N. M. (2025) Mineralogy of near-ore metasomatites of Kutuevskoe Au-Cu-porphyry ore occurrence (South Urals). *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 56 (3 (119)), 68–77. <https://doi.org/10.24412/1728-5283-2025-3-68-77> (In Russian).

Znamensky S. E., Kosarev A. M., Shafigullina G. T. (2022) Karagaikul gold-porphyratic ore occurrence (South Urals): geochemistry and petrogenesis of intrusive rocks, composition of minerals of near-ore metasomatites and ores. *Georesources*. 24 (3), 187–196. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.16> (In Russian).

Kosarev A. M., Puchkov V. N., Ronkin Y. L., Seravkin I. B., Kholodnov V. V., Grabezhev A. I., (2014) New data on the age and geodynamic position of copper-porphyry mineralization in the Main Uralian Fault zone (Southern Urals). *Doklady Earth Sciences*. 495 (1), 1317–1321. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1411004X>

Lupak E. M. (2012) Typomorphism of chlorites of the Sukharinsky ore field. *Izvestia of Tomsk Polytechnic University*. 321 (1), 52–55. (In Russian).

Marushchenko L. I., Baksheev I. A., Nagornaya E. V., Chitalin A. F., Nikolaev Yu. N., Kalko I. A., Prokofiev V. Yu.

(2015) Quartz-sericite and argillic alterations at the Peschanka Cu-Mo-Au deposit, Chukchi Peninsula, Russia. *Geology of ore deposits*. 57 (3), 239–252. (In Russian).

Metasomatism and metasomatic rocks (1998) Ed. V. A. Zharikova. Moscow: Scientific World Publ. 492. p. (In Russian).

Puzankov I. M., Kosorukov V. L., Okrugin V. M., Filosofova T. M. (2010) Chlorites of metasomatites from the Rodnikovoy gold-silver deposit, Southern Kamchatka. Materials of the IX regional youth scientific conference. Natural environment of Kamchatka. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology. 89–96. (In Russian).

Rusinov V. L. (1989) Metasomatic processes in volcanic rocks. Moscow: Nauka Publ. 214. p. (In Russian).

Shardakova G. Yu., Korovko A. V., Antonishin N. A. (2023) Generation and alteration conditions, fluid regime features of the ore-magmatic system of the South Saryshagan granite intrusion (Western Balkhash region). *Lithosphere*. 23 (5), 717–739. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-887-909> (In Russian).

Bailey S. W. (1988) Chapter 10. Chlorites: structures and crystal chemistry. *Hydrous Phyllosilicates*. 347–404. <https://doi.org/10.1515/9781501508998-015>

Bourdelle F., Parra T., Chopin C., Beyssac O. (2013) A new chlorite geothermometer for diagenetic to low-grade metamorphic conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 165 (4), 723–735. <https://doi.org/10.1007/s00410-012-0832-7>

Cathelineau M. (1988) Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay Minerals*. 23 (4), 471–485. <https://doi.org/10.1180/claymin.1988.023.4.13>

Hey M. H. (1954) A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society*. 30 (224), 277–292. <https://doi.org/10.1180/minmag.1954.030.224.01>

Hillier S., Velde B. (1991) Octahedral occupancy and chemical composition of diagenetic (low-temperature) chlorites. *Clay Minerals*. 26 (2), 149–168. <https://doi.org/10.1180/claymin.1991.026.2.01>

Inoue A. (1995) Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments // *Origin and Mineralogy of Clays*, Springer Berlin Heidelberg. 268–329. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-12648-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-12648-6_7)

Kranidiotis P., MacLean W. H. (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*. 82 (7), 1898–1911. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.7.1898>

Zane A., Weiss Z. (1998) A procedure for classifying rock forming chlorites based on microprobe data. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Natura Rendiconti Fis. Acc. Lincei*. 9, 51–56. <https://doi.org/10.1007/BF02904455>

Vidal O., Parra T., Trotet F. (2001) A thermodynamic model for Fe-Mg aluminous chlorite using data from phase equilibrium experiments and natural pelitic assemblages in the 100–600 °C and 1–25 Kbar range. *American Journal of Sciences*. 301 (6), 557–592. <https://doi.org/10.2475/ajs.301.6.557>

*Сведения об авторах:*

**Шафигуллина Гульнара Турдибаевна**, кандидат геол.-минерал. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа, Россия, shafigullina\_g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1044-7423>

**Знаменский Сергей Евгеньевич**, доктор геол.-минерал. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа, Россия, Znamensky\_Sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1844-4956>

**Косарев Александр Михайлович**, кандидат геол.-минерал. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа, Россия, amkosarev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4653-8466>

*About the authors:*

**Shafigullina Gulnara Turdibaevna**, Ph. D. (Geol., Mineral.), Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russia, shafigullina\_g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1044-7423>

**Znamensky Sergei Evgen'evich**, Dr. Sci. (Geol., Mineral.), Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russia, Znamensky\_Sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1844-4956>

**Kosarev Aleksandr Michailovich**, Ph. D. (Geol., Mineral.), Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russia, amkosarev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4653-8466>

*Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*The authors contributed equally to this article.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

Статья поступила в редакцию 12.01.2026; одобрена после рецензирования 12.02.2026; принята к публикации 02.03.2026

The article was submitted 12.01.2026; approved after reviewing 12.02.2026; accepted for publication 02.03.2026