

УДК 549.731:553.411(234.851)

DOI: 10.24930/1681-9004-2025-25-6-1384-1403

## Цинкохромит в золотофукситовых прожилках на Au-Pd месторождении Чудное (Приполярный Урал): генетический аспект

С. А. Онищенко

Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167982, г. Сыктывкар,  
ул. Первомайская, 54, e-mail: mine222@ya.ru

Поступила в редакцию 21.03.2025 г., принята к печати 30.04.2025 г.

**Объект исследований.** Цинкохромит в прожилках хромсодержащей слюды (фуксита) в метариолитах. **Цель исследований.** Изучение взаимоотношений цинкохромита с другими минералами и с Au-Pd минерализацией, определение места и роли цинкохромита в процессе минералообразования. **Методы.** Изучались полированные шлифы из образцов руд и смонтированных в эпоксидной смоле концентратов тяжелых минералов с использованием оптического и электронных микроскопов. Состав минералов выявлялся на сканирующих электронных микроскопах с энергодисперсионными спектрометрами. **Результаты.** Идиоморфные кристаллы цинкохромита в фукситовых прожилках (размером до 12 мкм) локализованы непосредственно в фуксите, реже в алланите, отмечены сравнения с самородным золотом и арсеноантимонидами палладия. Цинкохромит содержит 15.5–27.5 мас. % ZnO и 40.2–47.5 мас. % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Формула наиболее богатого Zn минерала:  $(\text{Zn}_{0.77}\text{Fe}_{0.13}^{2+}\text{Mn}_{0.10})(\text{Cr}_{1.37}\text{Fe}_{0.42}^{3+}\text{Al}_{0.21})_2\text{O}_4$ . Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в фуксите прожилков изменяется в значительном диапазоне (от 0.2 до 12.4 мас. %), но цинкохромит обычно заключен в фуксите с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более 1.5 мас. %. **Выводы.** Все породы в районе месторождения Чудное, в том числе руды, метаморфизованы в условиях биотитовой субфации зеленосланцевой фации. Образование цинкохромита связано с метаморфическими преобразованиями фукситовых прожилков, заключенных в риолитах. При перекристаллизации фуксита за счет последнего формируются кристаллы цинкохромита. Цинк, необходимый для синтеза цинкохромита, поступил из метаморфизованных фукситовых прожилков и вмещающих риолитов.

**Ключевые слова:** цинкохромит, хромсодержащий мусковит (фуксит), Cu-Pd-содержащее золото, алланит, ганит, риолиты, метаморфические преобразования

## Zincochromite in gold–fuchsite veins at the Chudnoe Au–Pd deposit (Subpolar Urals): Genetic aspects

Sergei A. Onishchenko

N.P. Yushkin Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar 167982, Russia,  
e-mail: mine222@ya.ru

Received 21.03.2025, accepted 30.04.2025

**Research subject.** Zincochromite in veins of chromium-bearing mica (fuchsite) in metarhyolites. **Aim.** To establish the relationships of zincochromite with other minerals and Au–Pd mineralization. To determine the place and role of zincochromite in the process of mineral formation. **Methods.** Polished sections from ore samples and concentrates of heavy minerals mounted in epoxy resin were studied using optical and electron microscopes. The composition of minerals was determined using SEM/EDS. **Results.** Idiomorphic crystals of zincochromite in fuchsite veins (up to 12 μm in size) are localized directly in fuchsite, less frequently in allanite; intergrowths with native gold and palladium arsenoantimonides were noted. Zincochromite contains 15.5–27.5 wt % ZnO and 40.2–47.5 wt % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The most Zn-rich mineral has the following formula:  $(\text{Zn}_{0.77}\text{Fe}_{0.13}^{2+}\text{Mn}_{0.10})(\text{Cr}_{1.37}\text{Fe}_{0.42}^{3+}\text{Al}_{0.21})_2\text{O}_4$ . The Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content in fuchsite veins varies across a significant range (from 0.2 to 12.4 wt %); however, zincochromite is usually enclosed in fuchsite with a Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content of more than 1.5 wt %. **Conclusions.** All rocks in the area of the Chudnoe deposit, including ores, are metamorphosed in the conditions of biotite subfacies of greenschist facies. The formation of zincochromite is associated with metamorphic transformations of fuchsite veins enclosed in rhyolites. During recrystallization of fuchsite, zincochromite crystals are formed at the expense of the latter. Zinc required for the synthesis of zincochromite came from metamorphosed fuchsite veins and host rhyolites.

**Для цитирования:** Онищенко С.А. (2025) Цинкохромит в золотофукситовых прожилках на Au-Pd месторождении Чудное (Приполярный Урал): генетический аспект. *Литосфера*, **25**(6), 1384–1403. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1384-1403>. EDN: OOFITB

**For citation:** Onishchenko S.A. (2025) Zincochromite in gold–fuchsite veins at the Chudnoe Au–Pd deposit (Subpolar Urals): Genetic aspects. *Lithosphere (Russia)*, **25**(6), 1384–1403. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1384-1403>. EDN: OOFITB

**Keywords:** zincochromite, chromium-containing mica (fuchsite), Cu-Pd-containing gold, allanite, gahnite, metarhyolite, metamorphic transformations

#### Acknowledgements

The author is grateful to N.D. Tolstykh for his comments and constructive suggestions, which were taken into account when finalizing the article.

## ВВЕДЕНИЕ

Цинкохромит  $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$  принадлежит к группе оксишпинели, подгруппе шпинели (шпинелидам) с общей формулой  $\text{A}^{2+}\text{B}^{3+}_2\text{O}_4$ . Двухвалентные катионы обычно представлены  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}$ , трехвалентные –  $\text{Al}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ . Между конечными членами подгруппы наблюдаются многочисленные серии изоморфных замещений, проявляющиеся между двух- и трехвалентными катионами (Bosi et al., 2019). Состав хромшпинелидов – обычных акцессорных минералов мафит-ультрамафитовых пород – описывается в основном изоморфной смесью конечных членов магнезиохромит-хромит-герцинит-шпинель  $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ – $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ – $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ – $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ . Наиболее широко распространен в магматических и метаморфических породах магнетит  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ , предельно железистый член подгруппы шпинели.

Цинкохромит и другие цинковые шпинелиды (ганит  $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ , франклинит  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  и гетеролит  $\text{ZnMn}_2\text{O}_4$ ) не столь широко распространены, как другие минералы подгруппы, но неизменно привлекают внимание в связи со своеобразием состава. Нередко цинковые шпинелиды обнаруживаются в породах, не отличающихся сколь-нибудь заметным содержанием цинка, поэтому обсуждается вопрос об источнике этого элемента.

Цинкохромит  $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$  был открыт в Cr-V-содержащих слюдистых метасоматитах уран-ванадиевого месторождения Средняя Падма в Южной Карелии. Породообразующими минералами метасоматитов являются хромовые и ванадиевые слюды: хромселадонит  $\text{KCrMg}[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$  (Пеков и др., 2000) и роскоэлит. Цинкохромит образует мелкие (2–10, изредка 40–50 мкм) идиоморфные кристаллы, содержит 37.05 мас. %  $\text{ZnO}$  и 53.30 мас. %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , формула минерала  $\text{Zn}_{1.04}(\text{Cr}_{1.61}\text{V}_{0.11}\text{Si}_{0.11}\text{Fe}^{3+}_{0.06}\text{Al}_{0.05})_{1.94}\text{O}_4$  (Нестеров, Румянцева, 1987).

Цинкохромит, обнаруженный в Карелии, наиболее близок к конечному члену  $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ , в других местах Zn-содержащие хромшпинелиды чаще всего содержат значительное количество изоморфных компонентов, при этом минералы с преобладанием  $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$  являются относительно редкими. Образование Zn-содержащих хромшпинелидов связано с метаморфическими и метасоматическими преобра-

зованиями пород базит-гипербазитового состава и метаморфизмом осадочных пород. Кроме того, детритовые зерна этих минералов обнаружены в осадочных породах различного возраста. В составе метаморфических шпинелидов помимо Zn совместно или раздельно с ним могут присутствовать Mn и V, намного превышая содержания этих элементов в магматогенных шпинелях.

Предельный уровень концентрации ZnO в шпинелях неизмененных магматических пород большинством исследователей оценивается в 1 мас. %, содержания выше этой величины чаще всего являются результатом наложенных процессов. Имеются исключения из этой закономерности, но они немногочисленны (Barnes, 2000; Силаев и др., 2010; Резницкий и др., 2023). Магматические хромшпинелиды базит-гипербазитовых пород при постмагматических и метаморфических процессах в той или иной степени замещаются вторичными хромшпинелидами, иногда магнетитом. Часто замещение происходит с образованием своеобразной зональности, в которой неизмененное или малоизмененное ядро окружено каймами вторичных хромшпинелидов, среди которых преобладают разности, лишенные первичного магния, нередко обогащенные трехвалентным железом. Во многих случаях процесс замещения сопровождается повышением концентрации Zn как в каймах, так и в малоизмененных ядрах, содержание ZnO достигает 11 мас. % (Wylie et al., 1987; Bjerg et al., 1993; Liipo et al., 1995; Barnes, 2000; Svetov et al., 2019; и др.).

Zn-Cr-содержащие шпинелиды распространены в метасоматитах по базит-ультрабазитам (лиственитах, родингитах, скарноподобных образованиях, жадеититах, нефритоидах, актинолититах) и сопутствующих гидротермально-метасоматических сульфидных рудах (Татаринов и др., 1980; Von Knorring et al., 1986; Wylie et al., 1987; Gahlan, Arai, 2007; Fanlo et al., 2015; Мурзин и др., 2017; Онищенко, Соболева, 2021). Содержание ZnO в шпинелидах варьирует, в некоторых случаях превышает 25 мас. %. Цинкохромит отмечен на Березовском золоторудном месторождении на Урале (Спиридонов и др., 2014), Zn-Cr-содержащие шпинелиды ряда цинкохромит-ганит присутствуют на колчеданном месторождении Оутокумпу в Финляндии (Treloar, 1987) и золоторудном место-

рождении в районе Сальсинье во Франции (Béziat, Monchoux, 1991).

В метаморфизованных осадочных горных породах распространены детритовые Zn-содержащие хромшпинелиды. Обогащение цинком связано с преобразованием зерен магматогенных хромшпинелидов при метаморфизме пород, но в некоторых случаях возможно поступление хромшпинелидов в осадочный бассейн уже в обогащенном цинком виде (Wylie et al., 1987; Chailis et al., 1995; Figueiras, Waerenborgh, 1997; Павлова, 2011; Никулова и др., 2014; Staddon et al., 2021; Новоселов и др., 2024). Содержание ZnO в хромшпинелидах изменчиво, цинкохромит обнаружен в обогащенных тяжелыми минералами слюдах кварцитов в докембрийских золотоносных конгломератах месторождения Тарква в Гане (Weiser, Hirdes, 1997), метапесчаниках алькесвожской свиты на Приполярном Урале (А.Б. Макеев, Б.А. Макеев, 2005) и гидротермально измененных арени-тах в импактном кратере Локне в Швеции (Alwmark, Schmitz, 2007).

Zn-Cr-содержащие шпинелиды присутствуют в глубоко метаморфизованных породах амфиболитовой и гранулитовой фаций, выделяющихся повышенными содержаниями хрома, шпинелиды обычно ассоциируют с другими хромсодержащими минералами (Donohue, Essene, 2005; Taguchi et al., 2012). Один из объектов, где выявлена обширная серия Zn-V-Cr шпинелей метаморфического генезиса, включающая цинкохромиты, – слюдянский комплекс Южного Прибайкалья. Вариации состава метаморфогенных шпинелей значительны и определяются в первую очередь валовым химическим составом протолита (Резницкий и др., 2023, 2024).

Обломочные зерна хромшпинелидов с эпигенетическими каймами, обогащенными Zn, присутствуют в девонских россыпях Среднего Тимана (Силаев и др., 2010; Глухов и др., 2015), цинкохромит обнаружен в алмазонасных россыпях р. Гуаниамо, Венесуэла (Johan, Ohnenstetter, 2010).

На золотопалладиевом месторождении Чудное (Приполярный Урал) цинкохромит приурочен к прожилкам Cr-содержащего мусковита (фуксита) в метариолитах. В этих же прожилках заключены Cu-Pd-содержащее золото и минералы палладия, определяющие промышленную значимость месторождения.

Цель исследования заключается в изучении взаимоотношений цинкохромита с другими минералами, в частности, с Au-Pd минерализацией, определение места и роли цинкохромита в процессе минералообразования. Для определения условий формирования цинкохромита рассмотрены геологические закономерности нахождения цинковых шпинелидов в различных породах как в районе месторождения Чудное, так и в других местах.

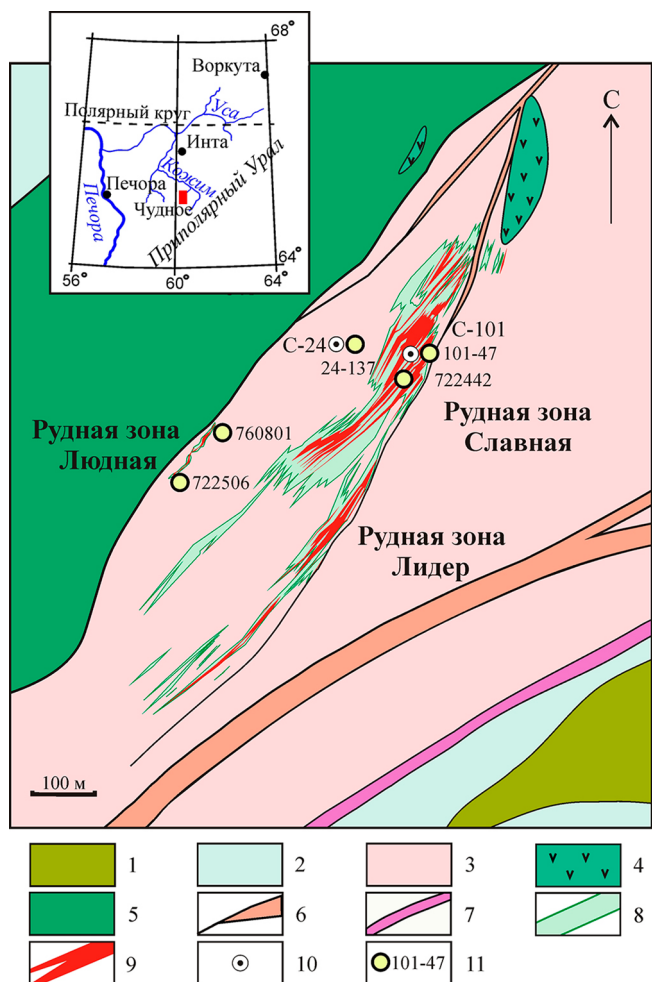
## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Чудное находится на западном склоне Приполярного Урала в бассейне р. Кожим. В геологическом отношении этот район относится к Центрально-Уральскому поднятию и северной части выделяющейся здесь крупной геологической структуры – Ляпинскому антиклинорию. Месторождение приурочено к осевой зоне Малдинской антиклинали, осложненной разрывными нарушениями. Ядро антиклинали сложено рифей-вендскими вулканогенными породами эффузивной и субвулканической фаций кислого и основного состава, а крылья – нижнепалеозойскими терригенными отложениями алькесвожской и обеизской свит.

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

Все породы регионально метаморфизованы. Метариолиты представлены массивными, флюидальными и брекчиевидными разностями редкопорфировой структуры, в различной степени рассланцованными. Порфировые вкрапленники калиевого полевого шпата (замещенного альбитом) и кварца слагают от 3 до 10% породы. Кварцполевошпатовая цементирующая масса имеет микропйкилобластовую, изредка сферолитовую структуру, характерны струйчатые скопления серицита. В риолитах распространена мелкая вкрапленность гематита. Метабазиты представлены зелеными сланцами альбит-хлоритового состава, в переменном количестве присутствуют кварц, эпидот и актинолит, характерно наличие магнетита и минералов титана (титанита, ильменита, лейкоксена). Индикаторным является минеральный парагенезис (мусковит–биотит–альбит), характерный для сланцев, образованных по андезитам (Онищенко, Кузнецов, 2019), который соответствует биотитовой субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма. В метагравелитах и метапесчаниках алькесвожской свиты обломочная часть представлена кварцем, цементирующая масса сложена кварц-серицитовым агрегатом с хлоритом, пиррофиллитом, хлоритоидом, гематитом, фукситом, магнетитом, ильменитом и лейкоксомом.

Вдоль разрывных нарушений риолиты преобразованы в кварц-серицитовые и серицитовые метасоматиты. В зонах контакта риолитов с базитами развиты породы альбит-кварцевые, альбит-



**Рис. 1.** Геологическая карта месторождения Чудное.

1 – обеизская свита (нижний ордовик): кварцитопесчаники, конгломераты, гравелиты; 2 – алькесвожская свита (верхний кембрий-нижний ордовик): гравелиты, песчаники с прослоями сланцев; 3 – риолиты; 4 – андезиты; 5 – базиты (базальты и долериты); 6, 7 – разрывные нарушения, вдоль которых распространены метасоматиты: 6 – кварц-серицитовые и серицитовые, 7 – диаспор-пирофиллитовые; 8 – зоны фукситовой минерализации; 9 – рудные тела ( $Au > 1$  г/т); 10 – скважины; 11 – места отбора образцов, содержащих цинкохромит.

**Fig. 1.** Geological map of the Chudnoe deposit.

1 – Obeese Formation (Lower Ordovician): quartzite sandstones, conglomerates, gravelites; 2 – Alkesvozh Formation (Upper Cambrian-Lower Ordovician): gravelites, sandstones with shale layers; 3 – rhyolites; 4 – andesites; 5 – mafic rocks (basalts and dolerites); 6, 7 – faults along which metasomatites are distributed: 6 – quartz-sericite and sericite, 7 – diaspore-pyrophyllite; 8 – zones of fuchsite mineralization; 9 – orebodies ( $Au > 1$  ppm); 10 – boreholes; 11 – sampling locations containing zincochromite.

кварц-серицитового и хлорит-серицитового состава. В районе месторождения фиксируется также протяженная зона глиноземистых серицит-пи-

рофиллитовых и пирофиллит-диаспоровых пород, трассирующая зону разлома (см. рис. 1). По одним представлениям, эти породы являются приразломными метасоматитами (Козырева и др., 2003), по другим – метаморфизованной верхнекембрийской линейной корой выветривания по рифей-вендским вулканитам (Озеров, 1996).

Золотое оруденение, относящееся к типу минерализованных прожилковых зон, приурочено к трещиноватым и брекчированным риолитам. Рудные зоны имеют северо-восточное простирание и крутое ( $50-70^\circ$ ) северо-западное падение. Золоторудные зоны Славная и Лидер протягиваются в центральной части месторождения, сменяя друг друга, на расстояние около 900 м. Вблизи контакта риолитов с базитами расположена маломощная зона Людная протяженностью около 80 м.

Самородное золото и минералы палладия приурочены главным образом к прожилкам  $Cr$ -содержащего мусковита (фуксита) в риолитах. Толщина фукситовых прожилков колеблется от долей миллиметра до 1.0–1.5 см, количество прожилков в рудных интервалах составляет 3–10 на погонный метр. Фуксит представлен тонкочешуйчатymi агрегатами зеленого цвета, обычное содержание  $Cr_2O_3$  в минерале 1–7 мас. %.

Вместе с фукситом в прожилках присутствуют алланит, в том числе  $Cr$ -содержащий (до 5 мас. %  $Cr_2O_3$ ), кварц, альбит, отмечаются кальцит, калиевый полевой шпат, титанит, апатит, цинкохромит и другие минералы. Гематит в фукситовых прожилках отмечается редко, иногда содержит примесь хрома (до 2 мас. %  $Cr_2O_3$ ). Золото образует в фуксите выделения чешуйчатой, уплощенной и неправильной формы, размер их варьирует от 1–2 мкм до 2 мм, крайне редко до 8 мм.

Самородное золото месторождения Чудное характеризуется значительными вариациями состава и строения. Содержание  $Au$  заключено в интервале от 65.8 до 92.7 мас. %,  $Ag$  – от 0.4 до 33.8 мас. %, почти всегда присутствует  $Cu$  – до 12.7 мас. % и  $Pd$  – до 2.9 мас. %, отмечается  $Hg$ . Самородное золото формировалось в виде гомогенного  $Au-Ag-Cu$ -твердого раствора при температуре выше  $220^\circ C$ . При понижении температуры в зависимости от исходного состава твердый раствор остается гомогенным либо, при содержании  $Cu > 1.1-2.5$  мас. %, распадается на две или три фазы. Характерны пластинчато-решетчатые и таблитчатые структуры распада твердых растворов, формирование которых завершилось при температуре  $\approx 100^\circ C$ . Матрица в структурах распада имеет  $Ag-Au$  состав, пластинки или таблички соответствуют фазе  $Au_3Cu$  и тетрааурикуприду  $AuCu$  (Palyanova et al., 2021; Онищенко, Кузнецов, 2022, 2023; Онищенко и др., 2024).

Основные  $Pd$  минералы месторождения – изомертиит/псевдомертиит  $Pd_{11}Sb_2As_2$  и мер-

тиит  $\text{Pd}_8\text{Sb}_{2.5}\text{As}_{0.5}$ , второстепенные – атенеит  $\text{Pd}_2(\text{As}_{0.75}\text{Hg}_{0.25})$  и неназванный минерал  $\text{Pd}_6\text{BiSe}$ , отмечается Pt минерал – сперрилит  $\text{PtAs}_2$  (Онищенко, Кузнецов, 2024).

Месторождение Чудное заметно отличается от других золоторудных и золотопалладиевых месторождений. Своеобразие выражается в том, что Au-Pd минерализация заключена в риолитах, включающих прожилки Cr-содержащего мусковита (фуксита) при отсутствии в непосредственной близости пород ультраосновного или близкого состава. В рудах нет сульфидных минералов, практически отсутствуют золотоносные кварцевые прожилки (Тарбаев и др., 1996; Palyanova et al., 2021, 2023; Онищенко, Кузнецов, 2023).

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

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

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

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

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

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы для исследований отобраны из керна скважин, полотна траншей и элювиальных обломков. Текстурно-структурные особенности и мине-

ральный состав пород изучались в кернах скважин, шлифованных образцах, петрографических шлифах, полированных шлифах руд и монтированных в эпоксидной смоле концентратов тяжелых минералов. Цинкохромит встречается не во всех фукситовых прожилках; детально изучены пять полированных шлифов, в которых цинкохромит присутствует в количестве десятков зерен, шлифы 101-47, 24-137 и 722442 характеризуют рудную зону Славную, 722506 и 760801 – рудную зону Людную.

Лабораторные исследования проведены в Институте геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН с использованием оптического микроскопа Nikon Eclipse LV 100 ND. Состав минералов определялся на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Vega 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (оператор Е.М. Тропников) и электронном микроскопе КУКУ EM-6900 с энергодисперсионным спектрометром Xplore 30 Oxford Instruments (оператор В.А. Радаев). Напряжение 20 кВ, диаметр электронного зонда 1 мкм. Время набора спектров составляло 60–80 с (600 тыс. импульсов). Эталонные – чистые металлы для Au, Ag, Fe, Cr, Zn, Ti и Mn, KBr для K, альбит для Na,  $\text{LaB}_6$  для La,  $\text{CeO}_2$  для Ce, волластонит для Ca, MgO для Mg,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для Al.

В связи с небольшими размерами зерен цинкохромита при микрозондовом анализе в некоторых случаях захватывается некоторая часть матрицы (фуксита или алланита). Компоненты, содержащиеся во вмещающих минералах ( $\text{K}_2\text{O}$  до 0.4, CaO до 0.5,  $\text{SiO}_2$  до 1.0 мас. %), а также эквивалентное количество  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 0.8 мас. %), FeO (до 0.4 мас. %) и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (до 0.2 мас. %) вычтены из первичных результатов анализов цинкохромита. Расчет содержания FeO и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в цинкохромите произведен по стехиометрии шпинелей  $\text{A}^{2+}\text{B}^{3+}_2\text{O}_4$  на 3 катиона, 8 положительных и отрицательных зарядов; сумма компонентов приведена к 100 мас. %.

Расчет содержания FeO и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в алланите выполнен на 8 катионов и 25 положительных зарядов (Armbruster et al., 2006). Расчет содержания FeO и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в Cr-содержащем мусковите (фуксите) произведен после пересчета результатов анализов на формулу диоктаэдрической слюды  $\text{K}(\text{Al}, \text{Cr})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ . Расчет осуществлен на 7 катионов и 22 положительных и отрицательных заряда.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Цинкохромит является характерным минералом руд месторождения Чудное. Он приурочен исключительно к прожилкам Cr-содержащего мусковита (фуксита) в риолитах, но обнаружен не во всех из них. Цинкохромит образует в фуксите скопления или цепочки многочисленных мелких зерен изометричной формы размером до 12 мкм, часто хорошо ограненных. В концентратах тяжелых мине-



лов цинкохромит обнаруживается в обломках золотофукситовых прожилков, а не в виде отдельных зерен, что говорит об отсутствии сколько-нибудь крупных его кристаллов. В алланит-фукситовых прожилках многочисленные кристаллики цинкохромита протягиваются вдоль контакта фуксита с алланитом, присутствуют в прожилковидных выделениях фуксита в алланите, переходящих в цепочки мелких зерен цинкохромита в алланите. Самородное золото обнаружено во всех фукситовых прожилках, содержащих цинкохромит, но срастания золота с цинкохромитом встречаются нечасто. С самородным золотом тесно связаны выделения минералов палладия, преимущественно изомертиита/псевдомертиита.

### Характеристика минеральных срастаний

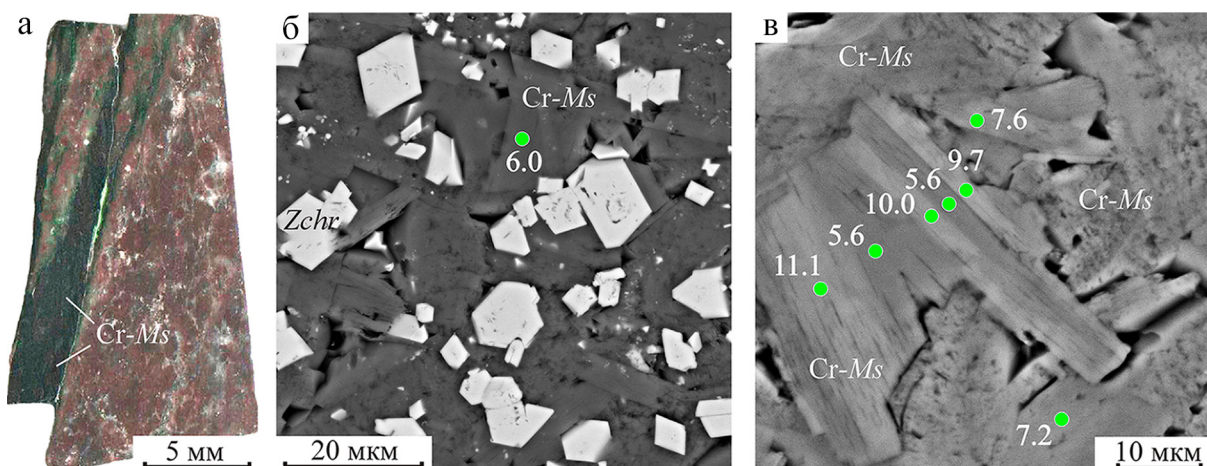
В фукситовых прожилках самородное золото и минералы палладия ассоциируют с алланитом, альбитом, кварцем, кальцитом, калиевым полевым шпатом, титанитом, апатитом и другими минералами (Palyanova et al., 2021; Онищенко, Кузнецов, 2023). В прожилках, содержащих цинкохромит, присутствует в целом такой же набор сопутствующих минералов.

В фукситовом прожилке (обр. 101-47) толщиной 2–3 мм (рис. 2а) цинкохромит концентрируется в виде линзовидных скоплений вдоль прожилка. В плоскости прожилка идиоморфные кристаллики цинкохромита размером до 12 мкм образуют

в фуксите густую вкрапленность (рис. 2б). Удлиненные и изометричные частицы золота размером 5–25 мкм рассеяны в фуксите, отмечены срастания золота с изомертиитом/псевдомертиитом.

В тяжелой фракции пробы 24-137 обломки фукситовых прожилков содержат обильную вкрапленность золота, изомертиита/псевдомертиита и идиоморфных кристалликов цинкохромита (рис. 3б), последние заключены в фуксите (рис. 3в) или минералах благородных металлов (рис. 3а). В некоторых обломках фукситовых прожилков золото и цинкохромит ассоциируют с другим арсеноантимонидом палладия – мертиитом. Кроме того, в этой же пробе отмечены срастания золота с минералом  $\text{Pd}_6\text{BiSe}$ , мертиитом, изомертиитом/псевдомертиитом и фукситом. Изомертиит замещается мертиитом с выделением сульфидов меди – халькозинидигенита и виттихенита  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ .

В алланит-фукситовом прожилке (обр. 722442) цинкохромит и самородное золото пространственно разобщены (рис. 4а). Многочисленные кристаллики цинкохромита протягиваются вдоль контакта фуксита с алланитом, фуксит содержит 5.3–8.2 мас. %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (рис. 4б). Частицы золота образуют в прожилке локальное скопление, золото находится в срастании с фукситом, кварцем, алланитом и изомертиитом/псевдомертиитом (рис. 4в). Фуксит здесь менее хромистый (1.4–3.5 мас. %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), его чешуйки ориентированы в основном параллельно контактам прожилка, но отмечаются полосы деформации и

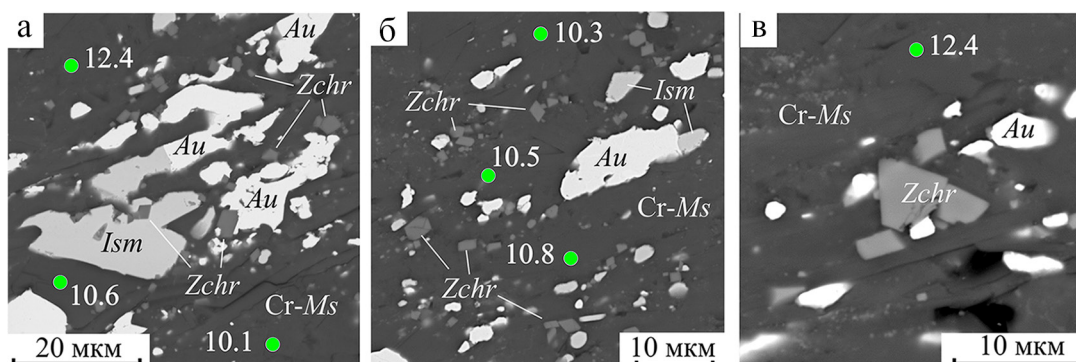


**Рис. 2.** Прожилок фуксита в риолите (а), кристаллы цинкохромита в фуксите (б), пластинчато-неоднородное строение фуксита (в).

Здесь и на рис. 3–6 содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в фуксите в мас. %. *Zchr* – цинкохромит, *Cr-Ms* – фуксит. Полированный шлиф 101-47. Изображения в отраженных электронах (б, в).

**Fig. 2.** Fuchsite vein in rhyolite (a), zinchromite crystals in fuchsite (b), lamellar-heterogeneous structure of fuchsite (v).

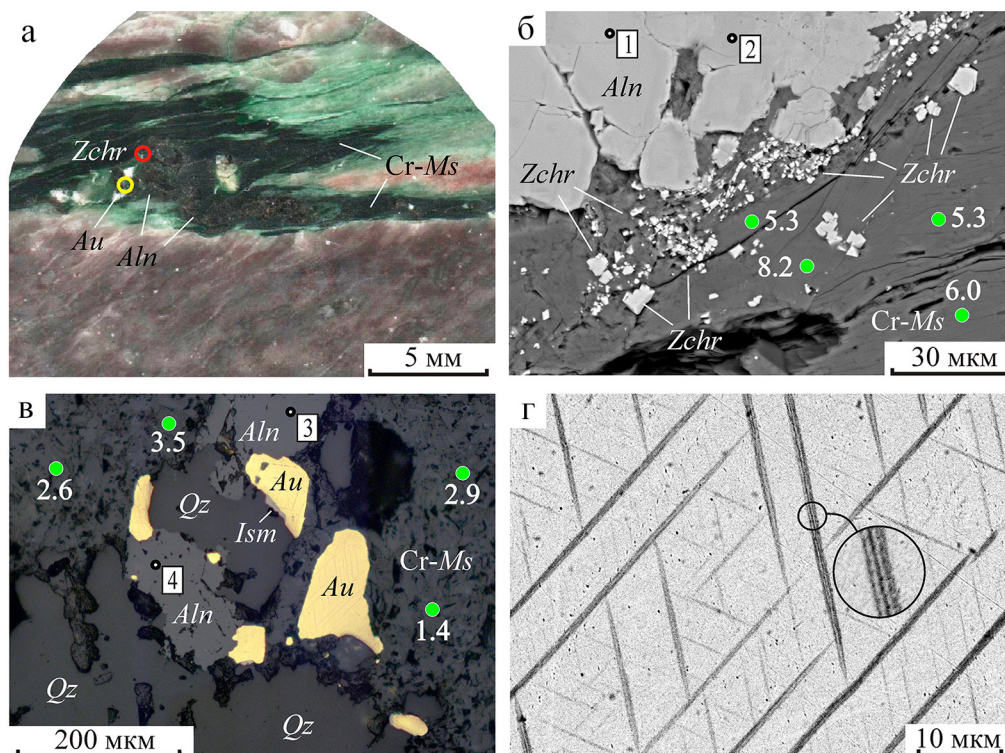
Here and in Fig. 3–6  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  content in fuchsite in wt %. *Zchr* – zinchromite, *Cr-Ms* – fuchsite. Polished section 101-47. BSE images (b, v).



**Рис. 3.** Идиоморфные кристаллы цинхромиита в фуксите в сростании с золотом и изомертиитом/псевдомертиитом.

*Zchr* – цинхромит, *Au* – золото, *Ism* – изомертиит/псевдомертиит, *Cr-Ms* – фуксит. Полированный шлиф 24-137. Изображения в отраженных электронах.

**Fig. 3.** Idiomorphic crystals of zinchromite in fuchsite intergrown with gold and isomertite/pseudomertite  
*Zchr* – zinchromite, *Au* – gold, *Ism* – isomertieite/pseudomertieite, *Cr-Ms* – fuchsite. Polished section 24-137. BSE images.



**Рис. 4.** Цинхромит и самородное золото в алланит-фукситовом прожилке в лиловом риолите.

а – общий вид прожилка; б – многочисленные кристаллики цинхромиита (*Zchr*), концентрирующиеся вдоль контакта фуксита (*Cr-Ms*) с алланитом (*Aln*); в – скопление частиц золота (*Au*), в сростании с золотом находятся изомертиит/псевдомертиит (*Ism*), алланит (*Aln*) и кварц (*Qz*); г – трехфазное строение самородного золота, обусловленное распадом твердого раствора. Цифрами в рамке обозначены точки анализа алланита (см. табл. 3). Полированный шлиф 722442. Изображения в отраженных электронах (б, г) и отраженном свете (в).

**Fig. 4.** Zinchromite and native gold in an allanite-fuchsite vein in purple rhyolite.

а – overall appearance of the vein; б – numerous crystals of zinchromite (*Zchr*), concentrated along the contact of fuchsite (*Cr-Ms*) with allanite (*Aln*); accumulation of gold particles (*Au*), intergrown with gold are isomertieite/pseudomertieite (*Ism*), allanite (*Aln*) and quartz (*Qz*); г – three-phase structure of native gold caused by the decomposition of a solid solution. The numbers in the box indicate the points of allanite analysis (Table 3). Polished section 722442. BSE images (б, г) and reflected light image (в).

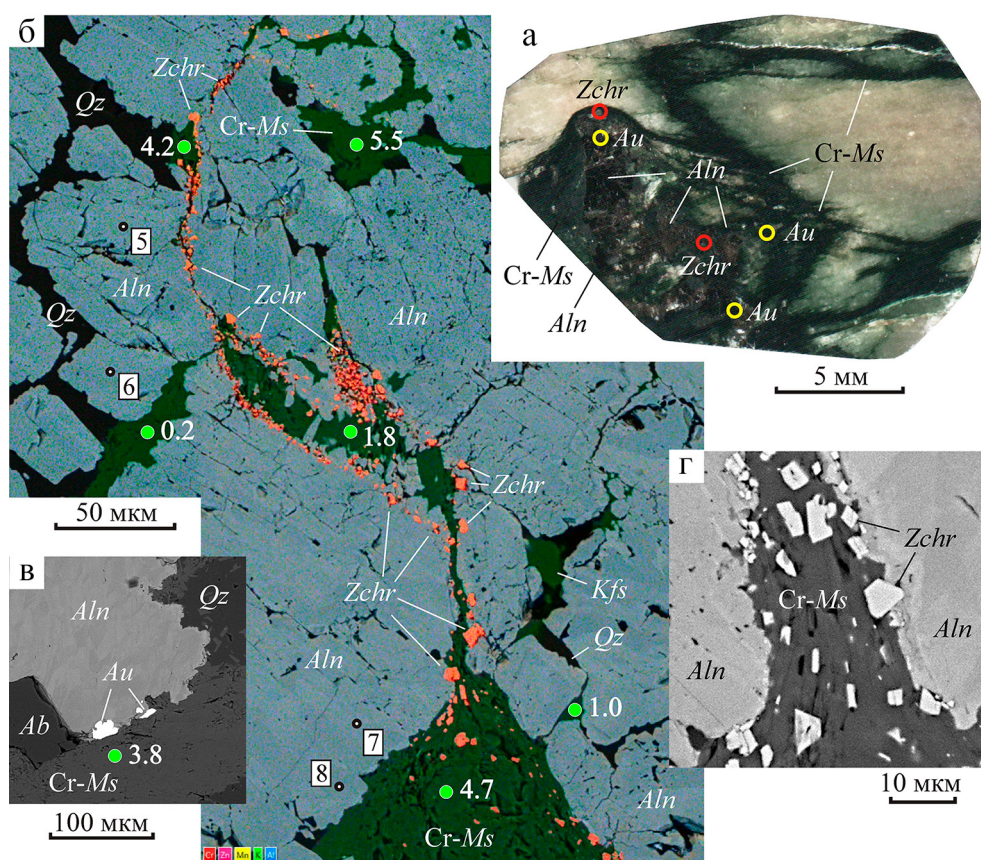


перекристаллизации с изменением их направления. В фуксите присутствует также крупное выделение фторапатита, содержащее тонкие прожилки безцериевого монацита-(Nd, La).

В алланит-фукситовом прожилке (обр. 722506) скопления алланита зернистого или шестоватого строения облекаются агрегатами чешуйчатого фуксита (рис. 5а). Идиоморфные кристаллики цинкохромита размером до 5–6 мкм находятся в фуксите и на контакте фуксита с алланитом (рис. 5г). Кроме того, кристаллики цинкохромита образуют длинный цепочечный прожилок, частью находящийся в фуксите, частью пересекающий зерна алланита (рис. 5б). Соотношения минералов показывают,

что цинкохромит является относительно поздним образованием в этой минеральной ассоциации. Частицы золота находятся в фуксите и на границе с алланитом (рис. 5в).

В алланит-фукситовом прожилке (обр. 760801) золото группами по 5–10 частиц от мельчайших размеров до 30 мкм чередуются с группами зерен цинкохромита (рис. 6а). Цинкохромит находится в фуксите, обычно вблизи от зерен алланита (рис. 6б), реже образует цепочки зерен в алланите и на границе алланита с кварцем, единичные кристаллики цинкохромита заключены в кварце. Золото находится в фуксите, в срастании с золотом отмечен изомертиит/псевдомертиит.



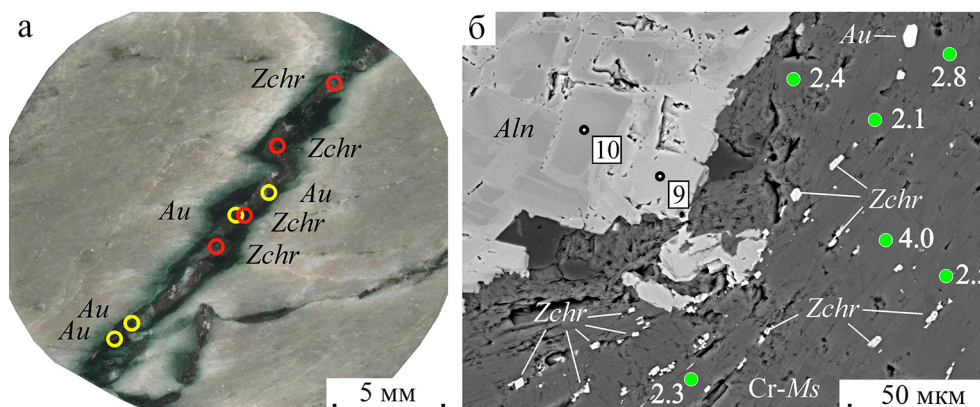
**Рис. 5.** Цинкохромит и самородное золото в алланит-фукситовом прожилке в риолите.

а – алланит-фукситовый прожилок в светлом риолите; б – цепочка зерен цинкохромита пересекает зерна алланита; в – золото на контакте фуксита и алланита; г – идиоморфные кристаллики цинкохромита в фуксите и вдоль контакта фуксита с алланитом. Цифрами в рамке обозначены точки анализа алланита (см. табл. 3). *Zchr* – цинкохромит, *Cr-Ms* – фуксит, *Aln* – алланит, *Qz* – кварц, *Kfs* – калиевый полевой шпат, *Ab* – альбит, *Au* – золото. Полированный шлиф 722506. б – многослойное (интегральное) изображение в характеристическом излучении Cr, Zn, Mn, K и Al, в, г – изображения в отраженных электронах.

**Fig. 5.** Zincochromite and native gold in allanite-fuchsite vein in rhyolite.

а – allanite-fuchsite vein in light rhyolite; б – chain of zincochromite grains crosses allanite grains; в – gold at the contact of fuchsite and allanite; г – idiomorphic zincochromite crystals in fuchsite and along fuchsite-allanite contact. The numbers in the box indicate the points of allanite analysis (Table 3). *Zchr* – zincochromite, *Cr-Ms* – fuchsite, *Aln* – allanite, *Qz* – quartz, *Kfs* – potassium feldspar, *Ab* – albite, *Au* – gold. Polished section 722506. б – multilayer (integral) images in the characteristic radiation of Cr, Zn, Mn, K and Al, в, г – BSE images.





**Рис. 6.** Цинкохромит и самородное золото в алланит-фукситовом прожилке в риолите.

а – алланит-фукситовый прожилок в светлом риолите; б – цинкохромит и золото находятся в фукситовой части прожилка. Цифрами в рамке обозначены точки анализа алланита (табл. 3). *Zchr* – цинкохромит, *Cr-Ms* – фуксит, *Aln* – алланит, *Au* – золото. Полированный шлиф 760801, б – изображение в отраженных электронах.

**Fig. 6.** Zinchromite and native gold in allanite-fuchsite vein in rhyolite.

а – allanite-fuchsite veins in light rhyolite; б – zinchromite and gold are found in the fuchsite part of the vein. The numbers in the box indicate the points of allanite analysis (Table 3). *Zchr* – zinchromite, *Cr-Ms* – fuchsite, *Aln* – allanite, *Au* – gold. Polished section 760801, б – BSE image.

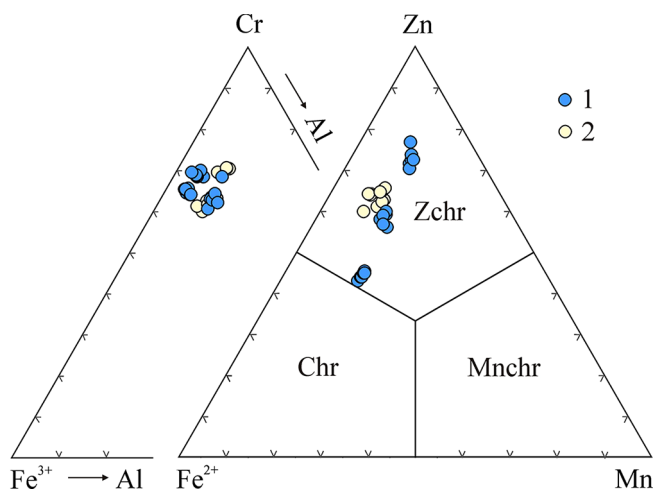
### Минералы золотофукситовых прожилков

*Цинкохромит* является изоморфной смесью ряда конечных членов подгруппы шпинели: цинкохромита  $ZnCr_2O_4$ , ганита  $ZnAl_2O_4$ , франклинита  $ZnFe_2O_4$ , хромита  $FeCr_2O_4$ , манганохромита  $MnCr_2O_4$  и магнетита  $FeFe_2O_4$ . По правилу доминирующей составной части (Natert, Burke, 2008) минерал квалифицируется как цинкохромит со значительными содержаниями двух- и трехвалентного железа, в меньшей степени алюминия и марганца (рис. 7). В целом вариации содержания минералообразующих компонентов в цинкохромите заключены в следующих пределах, мас. %:  $ZnO$  – 15.5–27.5,  $FeO$  – 4.0–12.9,  $MnO$  – 2.5–5.2,  $Cr_2O_3$  – 40.2–47.5,  $Fe_2O_3$  – 13.4–21.4,  $Al_2O_3$  – 1.5–5.6 (табл. 1). Диапазон колебаний состава минерала в конкретных образцах заметно меньше, причем намечаются различия между ними, в частности в обр. 722442 цинкохромит отличается устойчиво более высокими содержаниями  $ZnO$  и низкими  $FeO$ , в обр. 24-137, напротив, – низкими содержаниями  $ZnO$  и высокими –  $FeO$ . Менее значительны различия в составе цинкохромита в соотношениях трехвалентных катионов.

*Фуксит* является промежуточным членом изоморфного ряда мусковит  $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$  – хромфиллит  $KCr_2[AlSi_3O_{10}](OH, F)_2$  (Резницкий и др., 1997). На месторождении Чудное фуксит составляет основной объем золотоносных прожилков. Содержание  $Cr_2O_3$  в фуксите прожилков, вмещающих цинкохромит, изменяется от 0.2 до 12.4 мас. % (рис. 8), причем содержания  $Cr_2O_3$  выше 10 мас. %, отмеченные в обр. 101-47 и 24-137 (рудная зона

Славная) являются наиболее высокими на месторождении.

Представительные анализы (табл. 2) демонстрируют диапазон изменений содержаний  $Cr_2O_3$



**Рис. 7.** Состав хромшпинелидов в фукситовых прожилках.

Здесь и на рис. 8: 1 – рудная зона Славная, 2 – рудная зона Людная. *Zchr* – цинкохромит, *Chr* – хромит, *Mnchr* – манганохромит.

**Fig. 7.** Composition of chrome spinelides in fuchsite veins.

Here and in Fig. 8: 1 – Slavnaya ore zone, 2 – Lyudnaya ore zone. *Zchr* – zinchromite, *Chr* – chromite, *Mnchr* – manganochromite.

Таблица 1. Состав цинкохромита месторождения Чудное, мас. %

Table 1. Composition of zincochromite of the Chudnoe deposit, wt %

№ обр.	ZnO	FeO	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Формула
101-47	21.09	8.29	4.36	42.81	21.37	2.09	(Zn <sub>0.59</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.27</sub> Mn <sub>0.14</sub> )(Cr <sub>1.29</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.62</sub> Al <sub>0.09</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	20.66	8.87	4.16	43.53	20.79	1.98	(Zn <sub>0.58</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.28</sub> Mn <sub>0.14</sub> )(Cr <sub>1.31</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.60</sub> Al <sub>0.09</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	21.26	8.15	4.29	43.30	21.24	1.76	(Zn <sub>0.60</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.26</sub> Mn <sub>0.14</sub> )(Cr <sub>1.31</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.61</sub> Al <sub>0.08</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	20.04	8.76	4.92	42.61	21.16	2.52	(Zn <sub>0.56</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.28</sub> Mn <sub>0.16</sub> )(Cr <sub>1.28</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.61</sub> Al <sub>0.11</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	20.93	8.56	4.19	43.37	21.19	1.76	(Zn <sub>0.59</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.27</sub> Mn <sub>0.14</sub> )(Cr <sub>1.31</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.61</sub> Al <sub>0.08</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	20.29	8.88	4.59	42.59	21.04	2.61	(Zn <sub>0.57</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.28</sub> Mn <sub>0.15</sub> )(Cr <sub>1.28</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.60</sub> Al <sub>0.12</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
24-137	15.50	12.88	5.07	45.96	17.80	2.79	(Zn <sub>0.43</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.41</sub> Mn <sub>0.16</sub> )(Cr <sub>1.37</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.51</sub> Al <sub>0.12</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	15.79	12.51	5.09	46.79	17.54	2.27	(Zn <sub>0.44</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.40</sub> Mn <sub>0.16</sub> )(Cr <sub>1.40</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.50</sub> Al <sub>0.10</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	15.72	12.47	5.18	45.83	18.54	2.25	(Zn <sub>0.44</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.39</sub> Mn <sub>0.17</sub> )(Cr <sub>1.37</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.53</sub> Al <sub>0.10</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	16.06	12.11	5.19	45.81	18.72	2.10	(Zn <sub>0.45</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.38</sub> Mn <sub>0.17</sub> )(Cr <sub>1.37</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.54</sub> Al <sub>0.09</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	16.22	11.98	5.18	46.04	18.51	2.07	(Zn <sub>0.45</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.38</sub> Mn <sub>0.17</sub> )(Cr <sub>1.38</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.53</sub> Al <sub>0.09</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	16.04	12.03	5.20	46.25	18.98	1.50	(Zn <sub>0.45</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.38</sub> Mn <sub>0.17</sub> )(Cr <sub>1.39</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.54</sub> Al <sub>0.07</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
722442	25.70	4.86	4.01	42.13	18.56	4.74	(Zn <sub>0.72</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.15</sub> Mn <sub>0.13</sub> )(Cr <sub>1.26</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.53</sub> Al <sub>0.21</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	26.01	4.57	4.04	40.53	19.78	5.07	(Zn <sub>0.73</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.14</sub> Mn <sub>0.13</sub> )(Cr <sub>1.21</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.56</sub> Al <sub>0.23</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	25.24	5.09	4.23	42.11	18.39	4.94	(Zn <sub>0.70</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.16</sub> Mn <sub>0.14</sub> )(Cr <sub>1.26</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.52</sub> Al <sub>0.22</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	27.53	3.97	3.26	45.81	14.86	4.58	(Zn <sub>0.77</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.13</sub> Mn <sub>0.10</sub> )(Cr <sub>1.37</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.42</sub> Al <sub>0.21</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	26.45	4.37	3.84	43.04	17.46	4.84	(Zn <sub>0.74</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.14</sub> Mn <sub>0.12</sub> )(Cr <sub>1.29</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.50</sub> Al <sub>0.21</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	26.12	4.46	4.17	41.75	17.85	5.64	(Zn <sub>0.73</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.14</sub> Mn <sub>0.13</sub> )(Cr <sub>1.24</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.51</sub> Al <sub>0.25</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
722506	22.99	8.58	2.73	46.61	15.16	3.94	(Zn <sub>0.60</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.27</sub> Mn <sub>0.09</sub> )(Cr <sub>1.39</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.43</sub> Al <sub>0.18</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	21.67	9.85	2.85	47.39	13.36	4.89	(Zn <sub>0.60</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.31</sub> Mn <sub>0.09</sub> )(Cr <sub>1.40</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.38</sub> Al <sub>0.22</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	23.08	8.72	2.63	47.35	13.64	4.59	(Zn <sub>0.64</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.28</sub> Mn <sub>0.08</sub> )(Cr <sub>1.41</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.39</sub> Al <sub>0.20</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	23.12	8.83	2.48	47.47	13.50	4.60	(Zn <sub>0.64</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.28</sub> Mn <sub>0.08</sub> )(Cr <sub>1.41</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.38</sub> Al <sub>0.21</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
760801	21.98	8.71	3.53	41.96	19.31	4.51	(Zn <sub>0.61</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.28</sub> Mn <sub>0.11</sub> )(Cr <sub>1.25</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.55</sub> Al <sub>0.20</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	22.58	7.98	3.70	40.24	20.88	4.61	(Zn <sub>0.63</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.25</sub> Mn <sub>0.12</sub> )(Cr <sub>1.20</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.59</sub> Al <sub>0.21</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	22.28	8.18	3.66	40.88	21.11	3.89	(Zn <sub>0.62</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.26</sub> Mn <sub>0.12</sub> )(Cr <sub>1.22</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.60</sub> Al <sub>0.18</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	23.41	7.70	3.28	41.37	19.45	4.79	(Zn <sub>0.65</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.24</sub> Mn <sub>0.11</sub> )(Cr <sub>1.24</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.55</sub> Al <sub>0.21</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	23.69	7.50	3.32	42.55	17.67	5.26	(Zn <sub>0.66</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.24</sub> Mn <sub>0.10</sub> )(Cr <sub>1.27</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.50</sub> Al <sub>0.23</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	23.29	7.93	3.16	42.57	18.35	4.70	(Zn <sub>0.65</sub> Fe <sup>2+</sup> <sub>0.25</sub> Mn <sub>0.10</sub> )(Cr <sub>1.27</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0.52</sub> Al <sub>0.21</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>

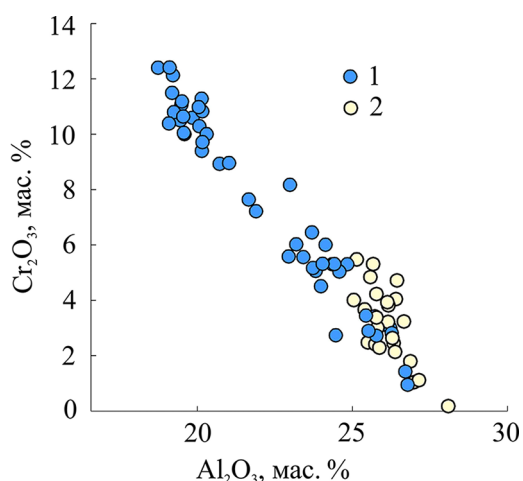


Рис. 8. Вариации состава фуксита (n = 71) в прожилках, содержащих цинкохромит.

Fig. 8. Variations in fuchsite composition (n = 71) in veins containing zincochromite.

в фуксите в прожилках вне зависимости от места локализации зерен цинкохромита в них. Примеры локальных вариаций содержаний Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в фуксите показаны на рис. 2–6. Обращает на себя внимание пластинчато-неоднородное строение фуксита (см. рис. 2в), светлые в отраженных электронах области характеризуются более высоким содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Изменчивость состава фуксита проявляется как в самих прожилках, так и между различными прожилками. Так, в обр. 760801 содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в фуксите не превышает 4.0 мас. %, в обр. 101-47 – не опускается ниже 4.5 мас. %, достигая исключительно высоких значений в обр. 24-137 (10.3–12.4 мас. % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). В целом можно отметить, что цинкохромит чаще присутствует в фуксите с умеренными и высокими содержаниями Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и не встречается в слюде, содержащей менее 1.5 мас. % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Фуксит характеризуется значительной железистостью, общее содержание железа, в пересчете на Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, заключено в интервале 7.3–9.5 мас. %, в со-

**Таблица 2.** Представительные анализы фуксита в прожилках, содержащих цинкохромит, мас. %**Table 2.** Representative analyses of fuchsite in veins containing zincochromite, wt %

№ обр.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	K <sub>2</sub> O	Сумма
101-47	45.88	0.0	23.99	4.51	7.48	1.45	1.17	11.19	95.67
	45.79	0.0	23.73	5.17	7.82	1.43	1.18	11.14	96.26
	45.55	0.0	22.95	5.58	6.75	2.42	0.99	10.91	95.15
	44.38	0.17	20.15	9.40	8.09	1.02	0.98	11.04	95.23
	45.35	0.20	19.85	10.59	5.85	2.85	0.98	10.77	96.44
	44.95	0.20	19.49	11.06	5.36	2.85	0.94	10.69	95.54
24-137	45.60	0.11	20.07	10.29	5.35	2.45	1.05	10.94	95.86
	45.44	0.0	20.16	10.83	4.88	2.59	1.14	10.75	95.79
	45.07	0.17	20.05	10.98	5.63	2.34	1.03	10.80	96.07
	44.65	0.0	19.51	11.18	6.31	1.72	1.10	10.80	95.27
	44.74	0.0	19.22	12.13	5.69	1.97	1.09	10.75	95.59
	44.80	0.12	19.11	12.41	5.64	2.10	1.12	10.64	95.94
722442	46.14	0.57	26.78	0.95	7.44	1.75	1.15	11.29	96.07
	46.14	0.22	25.52	2.90	6.17	2.08	1.20	11.11	95.34
	46.13	0.23	25.44	3.45	5.71	2.75	1.14	10.91	95.76
	46.05	0.18	24.84	5.30	6.45	1.93	1.11	11.11	96.97
	45.03	0.32	23.70	6.45	6.46	1.71	0.91	11.05	95.63
	44.62	0.29	22.99	8.17	6.59	1.22	0.93	11.04	95.85
722506	47.10	0.20	28.09	0.18	5.05	3.00	1.04	11.18	95.84
	46.50	0.35	26.87	1.80	4.74	3.03	0.94	11.10	95.33
	46.98	0.24	26.66	3.24	5.53	2.52	0.92	11.34	97.43
	46.05	0.0	26.13	3.93	6.07	1.94	0.85	11.22	96.19
	45.71	0.19	25.58	4.84	3.68	3.25	0.85	10.79	94.89
	46.24	0.23	25.14	5.48	4.76	2.85	0.84	11.07	96.61
760801	47.06	0.10	26.38	2.14	6.56	1.81	1.24	11.40	96.69
	46.08	0.23	26.33	2.46	6.76	2.09	0.92	11.21	96.08
	46.11	0.28	25.78	2.72	6.14	2.39	0.99	11.13	95.54
	46.13	0.25	25.72	3.43	5.99	2.52	1.06	11.02	96.12
	46.17	0.28	25.40	3.67	5.54	2.73	1.03	11.01	95.83
	46.00	0.19	25.05	4.01	6.54	2.19	0.99	11.12	96.09

ставе слюды преобладает железо в трехвалентной форме (см. табл. 2).

Большой диапазон содержаний Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в фуксите позволяет оценить характер изоморфных замещений в структуре минерала. Полученные данные подтверждают, что хром в структуре диоктаэдрической слюды в ряду мусковит KAl<sub>2</sub>[AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>2</sub> – хромфиллит KCr<sub>2</sub>[AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>](OH, F)<sub>2</sub> отчетливо замещает алюминий (см. рис. 8).

*Алланит* на месторождении присутствует во многих фукситовых прожилках, образуя зернистые, шестоватые, изредка радиально-лучистые агрегаты. Для алланита характерно неоднородное строение, хорошо заметное в отраженных электронах. Светлые разности обычно отличаются более высокими содержаниями REE. Во всех разновидностях алланита среди REE преобладает церий, т. е. минерал является алланитом-(Ce).

Состав алланита в фукситовых прожилках, содержащих цинкохромит, варьирует; составы алланита в различных прожилках частично перекрываются (табл. 3). Повышенное содержание каль-

ция и наличие трехвалентного Fe обусловлены изоморфной примесью эпидота. Низкими содержаниями REE и значительным преобладанием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> над FeO отличается темная в отраженных электронах разность в обр. 760801 из рудной зоны Людной (см. табл. 3, ан. 10, рис. 6б) с преобладанием эпидотовой составляющей в составе минерала. Наличие хрома для алланита в фукситовых прожилках, содержащих цинкохромит, нехарактерно, но в единичном случае отмечено 1.5 мас. % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в участке, относительно бедном REE (см. табл. 3, ан. 2; рис. 4б).

Состав *самородного золота* на месторождении изменяется в значительных пределах, при этом золоту каждой из рудных зон присущи свои особенности. Для зоны Славной наиболее характерно умеренно медистое золото с двухфазной структурой распада твердого раствора, менее распространено золото гомогенного строения с низким содержанием меди, реже встречается золото с трехфазной структурой распада. В рудной зоне Людной распространено серебристое золото гомо-



**Таблица 3.** Состав алланита в прожилках, содержащих цинкохромит, мас. %

**Table 3.** Composition of allanite in veins containing zincchromite, wt %

Оксид	Обр. 722442				Обр. 722506				Обр. 760801	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	31.85	31.53	32.38	32.07	32.06	32.40	32.70	33.22	32.92	34.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.68	19.02	19.52	18.07	18.92	18.73	18.82	19.28	20.02	20.43
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0	1.49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.35	6.61	5.77	4.03	6.98	6.07	5.05	5.73	6.48	11.87
FeO	6.84	5.38	6.01	6.95	5.36	6.03	6.86	6.36	5.12	1.53
MnO	1.61	1.75	1.94	1.23	0.90	0.0	0.0	0.0	1.00	0.62
CaO	13.17	13.66	13.77	13.57	14.90	15.45	15.00	15.72	15.52	19.68
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.02	3.95	5.24	4.95	3.63	3.03	3.45	2.89	3.75	1.44
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.56	8.69	8.71	10.30	8.45	7.71	9.24	7.99	7.43	4.61
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.31	0.95	0.60	1.20	0.98	1.30	1.52	1.53	0.89	0.59
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.18	3.94	3.11	3.91	3.37	3.19	3.47	3.67	3.84	1.65
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0	0.60	0.0	0.40	0.0	0.60	0.61	0.47	0.60	0.0
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.46	0.0
Σ	97.57	97.57	97.05	96.68	95.55	94.51	96.72	96.86	98.03	97.00
Коэффициенты в формулах в расчете на 8 катионов										
Si	2.99	2.89	2.96	3.01	2.95	3.00	3.00	3.00	2.95	2.96
Al	1.96	2.05	2.10	2.00	2.06	2.05	2.04	2.05	2.11	2.06
Cr	0.0	0.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe <sup>3+</sup>	0.31	0.46	0.40	0.28	0.49	0.42	0.35	0.39	0.44	0.76
Fe <sup>2+</sup>	0.54	0.41	0.46	0.55	0.41	0.47	0.53	0.48	0.38	0.11
Mn	0.13	0.14	0.15	0.10	0.07	0.0	0.0	0.0	0.08	0.05
Ca	1.32	1.34	1.34	1.36	1.47	1.53	1.47	1.52	1.49	1.80
La	0.17	0.13	0.18	0.17	0.12	0.10	0.12	0.10	0.12	0.05
Ce	0.40	0.29	0.29	0.35	0.29	0.26	0.31	0.27	0.25	0.14
Pr	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05	0.03	0.02
Nd	0.14	0.13	0.10	0.13	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.05
Sm	0.0	0.02	0.0	0.01	0.0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0
Gd	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0
Σ REE	0.75	0.60	0.59	0.70	0.55	0.53	0.61	0.56	0.55	0.26

Примечание. Номера анализов 1–10 соответствуют точкам анализа на рис. 4–6.

Note. The analysis numbers 1–10 correspond to the analysis point in Fig. 4–6.

генного строения с крайне низкими содержаниями меди. Наибольшим разнообразием характеризуется золото в зоне Лидер: на юго-западном ее фланге золото серебристо-гомогенного строения, в центральной распространено медьсодержащее золото с двух- и трехфазной структурой распада; особенностью зоны является наличие частиц золота с содержанием меди более 6 мас. %. Изменчивость состава самородного золота проявляется не только в различиях между рудными зонами, но и в дискретном характере изменения состава золота в рудных зонах, отражая приуроченность золота определенного состава к группам сближенных прожилков (Palyanova et al., 2021; Онищенко, Кузнецов, 2023).

Состав самородного золота в фукситовых прожилках, содержащих цинкохромит, отражает отмеченные закономерности. В рудной зоне Славной в обр. 101-47 золото имеет гомогенное строение, характеризуется выдержанным составом, мас. %: Au –

84.9–86.5, Ag – 13.4–14.2, Cu – 0.5–0.8, Pd – до 0.6. В пробе 24-137 (см. рис. 3) золото также имеет гомогенное строение, слегка отличаюсь по составу от предыдущего образца, мас. %: Au – 88.1–89.9, Ag – 10.0–11.4, Cu – до 0.5, Pd – до 0.9. В обр. 722442 все частицы золота демонстрируют гетерогенное (трехфазное) строение, обусловленное распадом Au-Ag-Cu-твердого раствора (см. рис. 4г). На первом этапе в Au-Ag матрице образовались пластинки гомогенного медистого золота, которые в последующем распались на фазу Au<sub>3</sub>Cu и тетраурикуприд AuCu. Исходный (валовый) состав самородного золота, мас. %: Au – 85.5, Ag – 11.0, Cu – 3.5.

В рудной зоне Людной золото имеет гомогенное строение: в обр. 722506 (см. рис. 5в) частицы золота содержат 21–22 мас. %, Ag, Cu и Pd не обнаружены, в обр. 760801 (см. рис. 6б) содержание Ag составляет 29.5–33.0 мас. %, Cu и Pd также не обнаружены.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Фукситовые прожилки, содержащие цинкохромит, обнаружены в двух рудных зонах месторождения – Славной в центральной части месторождения и зоне Людной, узкой непротяженной полосой протянувшейся вдоль контакта с базитами.

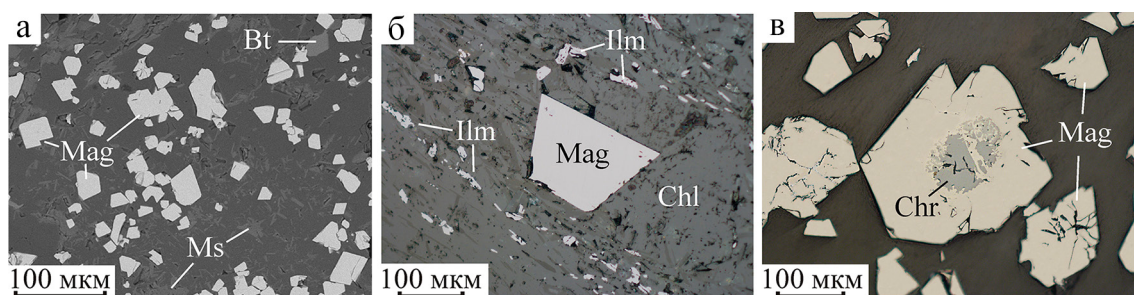
Цинкохромит приурочен исключительно к прожилкам фуксита. Содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в фуксите прожилков, вмещающих цинкохромит, изменяется в значительном диапазоне (от 0.2 до 12.4 мас. %), обычно хромшпинелид заключен в фуксите с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  более 1.5 мас. %. Из трех изученных образцов рудной зоны Славной в двух зафиксированы наиболее высокохромистые фукситы, отмеченные на месторождении. В целом во всех рудных зонах в преобладающей части прожилков содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в фуксите заключено в интервале 1–7 мас. %. Рудная зона Людная отличается от Славной высоким содержанием Ag в самородном золоте и доминированием мертиита среди арсеноантимонидов палладия.

Идиоморфные кристаллы цинкохромита локализованы непосредственно в фуксите, реже в алланите и кварце, отмечены сростания с самородным золотом и арсеноантимонидами палладия. Вариации в составе цинкохромита обусловлены соотношениями между Zn и  $\text{Fe}^{2+}$ , содержание Mn невысокое и довольно стабильное (см. рис. 7). Состав минерала в рудной зоне Славной изменяется от низко- до высокоцинкового, состав цинкохромита в рудной зоне Людной занимает промежуточное положение. По соотношениям трехвалентных катионов все изученные цинкохромиты близки между собой.

Возможны два варианта образования цинкохромита, различающиеся относительным временем формирования цинкохромита и фуксита. Первый вариант предусматривает одновременное образование этих двух минералов, в этом случае формирование цинкохромита обусловлено небольшой примесью цинка в хромоносных гидротермах. Во втором варианте цинкохромит образуется значительно позже фукситовых прожилков, что объясняется метаморфизмом пород, при котором наряду с перекристаллизацией фуксита за счет последнего формируются идиоморфные кристаллики цинкохромита. Цинк, необходимый для синтеза цинкохромита, поступает в этом случае из метаморфизованных фукситовых прожилков и вмещающих риолитов.

При характеристике минеральных сростаний уже обращалось внимание, что цинкохромит является относительно поздним образованием в алланит-фукситовом прожилке: цепочки его зерен развиваются вдоль трещин, пересекающих зерна алланита (см. рис. 5б). Однако взаимоотношения минералов в большей части образцов не дают однозначного вывода о последовательности их образования. В связи с этим необходимо рассмотреть геологическую ситуацию в более широком контексте.

Как указывалось ранее, все породы в районе месторождения метаморфизованы в условиях биотитовой субфации зеленосланцевой фации с преобразованием исходных пород в соответствующие по составу метаморфические производные. Характерными метаморфогенными оксидными минералами пород основного и среднего состава являются идиобласты магнетита и ильменита (рис. 9а, б). В базальном горизонте алькесвожской свиты, сложенном преимущественно метагравелитами, рас-



**Рис. 9.** Метаморфогенные кристаллы магнетита в мусковит-биотит-альбитовой породе по андезиту (а), в хлорит-серицитовом сланце по базиту (б), в метагравелитах алькесвожской свиты, магнетит содержит реликты хромшпинелида (в).

Mag – магнетит, Ms – мусковит, Bt – биотит, Ilm – ильменит, Chl – хлорит, Chr – хромшпинелид. Изображения в отраженных электронах (а) и отраженном свете (б, в). Полированные шлифы: а – 116-194, б – 14-5, в – магнитная фракция пробы 205-136.

**Fig. 9.** Metamorphogenic crystals of magnetite in muscovite-biotite-albite rock after andesite (a), in chlorite-sericite shale after basite (б), in metagravellites of the Alkesvozh formation, magnetite contains relics of chromspinelide (в).

Mag – magnetite, Ms – muscovite, Bt – biotite, Ilm – ilmenite, Chl – chlorite, Chr – chromspinelide. BSE image (а) and reflected light images (б, в). Polished sections: а – 116-194, б – 14-5, в – magnetic fraction of sample 205-136.

пространены идиоморфные кристаллы магнетита (рис. 9в). Морфология идиоморфных и субидиоморфных микрокристаллов цинкохромита в фукситовых прожилках (см. рис. 2–6) также позволяет рассматривать их как идиобласты.

Цинковые шпинелиды помимо фукситовых прожилков выявлены еще в двух геологических обстановках в непосредственной близости от месторождения Чудное. Детритовые Zn хромшпинелиды присутствуют в метапесчаниках и метагравелитах алькесвожской свиты, а ганит  $ZnAl_2O_4$  обнаружен в диаспор-пирофиллитовых породах, приуроченных к зоне разлома.

Zn хромшпинелиды в метапесчаниках алькесвожской свиты встречаются в виде мелких зерен (0.15–0.30 мм), сопровождаемых оторочками фуксита. Форма зерен округлая, поверхность корродированная без какой-либо огранки, трещины в минерале выполнены фукситом. Состав минералов, мас. %: ZnO – 5.0–27.4, FeO – 1.4–15.9, MnO – 4.3–11.4, MgO – 0.0–3.5,  $Cr_2O_3$  – 45.5–62.7,  $Al_2O_3$  – 0.5–15.7,  $Fe_2O_3$  – 0.0–6.7,  $TiO_2$  – 0.0–0.13,  $V_2O_5$  – 0.0–0.4. Зерна с наиболее высокими содержаниями цинка соответствуют цинкохромиту (А.Б. Макеев, Б.А. Макеев, 2005). Кроме того, реликты хромшпинелида обнаружены в магнетите в базальных метагравелитах. Магнетит представлен октаэдрическими кристаллами, реликты хромшпинелида имеют изометричную или неправильную форму, иногда расчленены на отдельные фрагменты. Состав хромшпинелидов в разных зернах различается по содержанию  $Cr_2O_3$  и  $Al_2O_3$ , заметную роль в их составе играют Zn и Mn. В реликте хромшпинелида (см. рис. 9в) наиболее высокое содержание Zn отмечено на границе с магнетитом, мас. %: ZnO – 12.0, FeO – 19.9, MnO – 2.5,  $Cr_2O_3$  – 46.4,  $Fe_2O_3$  – 4.8,  $Al_2O_3$  – 12.6, сумма – 98.2.

Ганит  $ZnAl_2O_4$  в виде мелких (до 0.1 мм) октаэдрических кристаллов обнаружен в высокоглиноземистых (33.3 мас. %  $Al_2O_3$ ) диаспор-пирофиллитовых породах в двух местах на удалении 1 и 7 км от месторождения Чудное (А.Б. Макеев, Б.А. Макеев, 2005; Козырева, Швецова, 2007).

Таким образом, в зависимости от состава протолита при метаморфизме образуются различные по составу шпинелиды: в породах основного и среднего состава – магнетит, хромсодержащем субстрате (фукситовых прожилках в риолитах) – цинкохромит, а в высокоглиноземистых породах – цинк-алюминиевая шпинель ганит. Замещение детритовых хромшпинелидов Zn-содержащими разновидностями в породах алькесвожской свиты вписывается в концепцию метаморфического процесса, но нельзя исключать, что некоторая часть хромшпинелидов поступала в осадок уже в обогащенном цинком виде.

Вероятнее всего, определяющим фактором, приводящим к образованию Zn-содержащих шпинелидов, являются химические особенности цинка, который проявляет как халькофильные, так и литофильные свойства. Химическая индивидуальность цинка ярко проявляется в минералах подгруппы шпинели. На высокую способность к образованию цинковых шпинелей указывает распад франклинит-магнетитового твердого раствора на франклинит и магнетит (Valentino et al., 1990). Даже при незначительных содержаниях Zn в магнетите при распаде твердого раствора отмечено образование самостоятельной фазы – ганита (Попов и др., 2017).

Вхождение цинка в структуру хромшпинелидов кристаллохимически обусловлено сходством строения электронных оболочек, ионных радиусов  $Zn^{2+}$  и  $Fe^{2+}$ , что приводит к близким параметрам элементарных ячеек хромита  $FeCr_2O_4$  и цинкохромита  $ZnCr_2O_4$ , составляющих 8.376 и 8.327 Å соответственно (Biagioni, Pasero, 2014). Термодинамических ограничений для образования Zn-хромшпинелидов в магматических условиях не существует (Levy et al., 2005), хромиты-ферриты цинка со структурой шпинели синтезируются по керамической технологии путем твердофазных реакций при высоких температурах (Иванов и др., 2013). Невысокие содержания Zn в первичных шпинелидах базит-ультрабазитовых пород обусловлены геохимическими причинами: низкими содержаниями Zn в породе, несопоставимыми соотношениями между шпинелеобразующими компонентами (Fe, Mg и Zn) и между Zn и Cr, что не позволяет реализоваться возможности вхождения Zn в хромшпинелид.

Иначе обстоит дело при метаморфических и особенно метасоматических преобразованиях базит-гипербазитов, при которых возможен обмен компонентами с окружающей средой, в результате чего соотношение между Cr и Zn может измениться. Самые благоприятные условия для вхождения Zn в хромшпинелид возникают при метаморфизме осадочных пород, в которых практически весь хром сосредоточен в детритовых зернах хромшпинелида. В этом случае метаморфогенный хромшпинелид просто обязан обогащаться Zn, заимствуя его из окружающей среды.

Иначе обстоит дело при метаморфических и особенно метасоматических преобразованиях базит-гипербазитов, при которых возможен обмен компонентами с окружающей средой, в результате чего соотношение между Cr и Zn может измениться. Самые благоприятные условия для вхождения Zn в хромшпинелид возникают при метаморфизме осадочных пород, в которых практически весь хром сосредоточен в детритовых зернах хромшпинелида. В этом случае метаморфогенный хромшпинелид просто обязан обогащаться Zn, заимствуя его из окружающей среды.

Zn-хромшпинелиды и ганит в ряде месторождений встречаются совместно с сульфидами, предлагалось даже использовать эти минералы в качестве индикатора сульфидного оруденения (Groves et al., 1977; Wylie et al., 1987; Heimann et al., 2005). Co-существование оксидных и сульфидных минералов цинка возможно в некотором диапазоне, определяемом фугитивностью кислорода и активностью сульфид-иона. Тем не менее совершенно очевидно, что более благоприятные условия для существования цинковых шпинелей будут реализованы при отсутствии сульфидной серы. В таких условиях образовались скопления оксидных минералов цинка, в частности ганита и франклинита, на месторож-



дениях Франклин и Стерлинг Хилл (Нью Джерси, США) и рудопроявлениях Пелагонийского массива в Македонии (Ермолаева и др., 2016).

Анализ природных парагенезисов позволяет заключить, что цинк обладает исключительной способностью к концентрации в минералах подгруппы шпинели, в частности в хромшпинелидах. При метаморфических процессах возможно образование цинковых и Zn-содержащих шпинелей в породах с низким валовым содержанием Zn. Это заключение основано как на литературных данных, так и материалах, полученных при изучении месторождения Чудное.

В целом цинк в метаморфических породах наиболее значительно концентрируется в минералах подгруппы шпинели и ставролите. Содержание цинка в шпинелидах изменяется в существенных пределах, высокая доля ганитовой составляющей характерна для шпинелей в метабокситах, минералы ряда ганит – герцинит распространены в метасадочных и метавулканогенных породах (Heimann et al., 2005). Содержания Zn в шпинельсодержащих породах варьируют, низкие содержания Zn (42 г/т) отмечены в гранулитах Богемского массива в Чехии, шпинель содержит 25.3–26.9 мас. % ZnO (56–59 мол. % ганита) (Tajčmanová et al., 2009). Метапелитовые гнейсы на северо-западе Адирондака (США) содержат 113–136 г/т Zn, доля ганита в акцессорных шпинелидах составляет 20–31 мол. %, в кордиерит-амфиболовых породах в Калифорнии валовое содержание Zn 624 г/т, шпинель включает 42 мол. % ганита (Stoddard, 1979).

В диаспор-пирофиллитовых породах в районе месторождения Чудное, в которых обнаружен ганит, содержание Zn варьирует от 8 до 500 г/т (Козырева и др., 2003).

В Cr-содержащих породах Zn и Cr в составе шпинелей обычно присутствуют совместно. В Cr-содержащих кварцитах и слюдяных сланцах Северного Нельсона (Новая Зеландия) валовое содержание Zn равняется 8–217 г/т. Zn-содержащий хромшпинелид, заключенный в агрегатах Cr-содержащего мусковита или уваровита, имеет до 13.7 мас. % ZnO (Challis et al., 1995). В V-Cr-содержащих метапелитах (Вайоминг, США), метаморфизованных в гранулитовой фации, основная часть цинка в породе сконцентрирована в Zn-Cr-содержащем герцините, включающем 4.4–5.7 мас. % ZnO (Donohue, Esene, 2005). В V-Cr-содержащих параметаморфических породах слюдянского комплекса в Южном Прибайкалье выявлены как Zn-содержащие хромшпинелиды, так и собственно цинкохромиты. Валовое содержание Zn в кварцитах низкое (20–40 г/т), и, скорее всего, его основной концентратор – сам хромшпинелид (Резницкий и др., 2023).

На месторождении Чудное содержания Zn в породах невысокие. В фукситсодержащих риолитах

концентрация Zn составляет 35–90 г/т, в риолитах без фукситовых прожилков – 40–100 г/т.

Таким образом, в Cr-содержащих метаморфических породах цинк в значительной степени, а в некоторых случаях преимущественно концентрируется в Cr-содержащих шпинелидах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идиоморфные кристаллы цинкохромита в фукситовых прожилках (размером до 12 мкм) локализованы непосредственно в фуксите, реже в алланите, отмечены сростания с самородным золотом и арсеноантимонидами палладия. Вариации состава цинкохромита заключены в следующих пределах, мас. %: ZnO – 15.5–27.5, FeO – 4.0–12.9, MnO – 2.5–5.2, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 40.2–47.5, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 13.4–21.4, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1.5–5.6, при этом состав минерала в конкретных фукситовых прожилках относительно постоянен. Содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в фуксите прожилков, вмещающих цинкохромит, изменяется в значительном диапазоне (от 0.2 до 12.4 мас. %), обычно цинкохромит заключен в фуксите с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более 1.5 мас. %. Фуксит относится к изоморфному ряду мусковит – хромфиллит, при этом слюда характеризуется высоким содержанием железа (7.3–9.5 мас. % в пересчете на Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Все породы в районе месторождения Чудное, в том числе руды, метаморфизованы в условиях биотитовой субфации зеленосланцевой фации. Наблюдается значительный разрыв во времени между формированием золотофукситовых прожилков в риолитах (наиболее вероятно – 500 млн лет) и их метаморфизмом (250 млн лет). Образование цинкохромита связано с метаморфическими преобразованиями фукситовых прожилков, при которых наряду с перекристаллизацией фуксита за счет последнего возникают идиоморфные кристаллики цинкохромита. Цинк, необходимый для синтеза цинкохромита, поступил из метаморфизованных фукситовых прожилков и вмещающих риолитов. Цинкохромит, таким образом, является индикатором метаморфических преобразований фукситовых прожилков.

В зависимости от состава протолита при метаморфизме образуются различные по составу шпинелиды: в породах основного и среднего состава – магнетит, в хромсодержащем субстрате (фукситовых прожилках в риолитах) – цинкохромит, а в высокоглиноземистых породах – ганит.

Анализ природных парагенезисов метаморфических пород позволяет заключить, что цинк обладает исключительной способностью к концентрации в минералах подгруппы шпинели, в частности в хромшпинелидах. На месторождении Чудное цинкохромит образовался в породах с валовым содержанием Zn 35–100 г/т.

## Благодарности

Автор благодарен Н.Д. Толстых за высказанные замечания и конструктивные предложения, которые были учтены при доработке статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреичев В.Л. (2010) Геохронология гранитоидного магматизма Приполярного Урала. *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (11), 7-12.
- Глухов Ю.В., Макеев Б.А., Варламов Д.А., Шевчук С.С., Исаенко С.И. (2015) Хромшпинелиды с цинксодержащими эпигенетическими каймами из девонских конглобрекчиевых горизонтов россыпей проявления Ичетью (Средний Тиман). *Литосфера*, (2), 103-120.
- Ермолаева В.Н., Чуканов Н.В., Янчев С., Ван К.В. (2016) Эндогенный парагенезис несulfидных минералов халькофильных элементов в орогенной зоне “смешанной серии” Пелагонийского массива, Македония. *Новые данные о минералах*, (51), 12-19.
- Иванов В.В., Ульянов А.К., Шабельская Н.П. (2013) Ферриты-хромиты переходных элементов: синтез, структура, свойства. М.: Издательский дом Академии естествознания, 94 с.
- Козлов А.В., Корзников В.Д., Смоленский В.В., Кузнецов С.К., Савичев А.А., Иванов А.С., Васильев Е.А. (2024) Проблемы оценки возраста Au-Pd минерализации месторождения Чудное (Приполярный Урал). *Зап. РМО*, **153**(3), 42-63. <https://doi.org/10.31857/S0869605524030036>
- Козырева И.В., Швецова И.В. (2007) Находка редкого минерала ганита в диаспор-пирофиллитовых сланцах Приполярного Урала. *Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерализация Северо-Запада России*. Мат-лы Всерос. конф. (Отв. ред. А.И. Голубев). Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 176-178.
- Козырева И.В., Юдович Я.Э., Швецова И.В., Кетрис М.П., Ефанова Л.И. (2003) Глиноземистые и железистые породы Приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 101 с.
- Кузнецов С.К., Андреичев В.Л. (1998) Возраст золотофукситовой минерализации в риолитах хребта Малдырьд. *Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов*. Мат-лы Всерос. конф. (Отв. ред. Н.П. Юшкин). Сыктывкар: Геопринт, 18-19.
- Макеев А.Б., Макеев Б.А. (2005) Цинковые хромшпинелиды Среднего Тимана и Приполярного Урала. *Докл. АН*, **404**(2), 235-240.
- Моралев Г.В., Борисов А.В., Суренков С.В., Тарбаев М.Б., Пономарчук В.А. (2005) Первые  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  датировки слюд Au-Pd-P3Э проявления Чудное (Приполярный Урал). *Докл. АН*, **400**(2), 243-246.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А., Замятина Д.А. (2017) Эпигенетические преобразования хромшпинелида в процессе родингитизации и нефритизации на Агардагском проявлении золота (Южная Тува). *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 164, 227-231.
- Нестеров А.Р., Румянцева Е.В. (1987) Цинкохромит  $\text{Zn-Cr}_2\text{O}_4$  – новый минерал из Карелии. *Зап. ВМО*, **116**(3), 367-371.
- Никулова Н.Ю., Филиппов В.Н., Швецова И.В. (2014) Возможные источники рудных минералов в нижнепалеозойских псефитах в верховье реки Малая Кара (Полярный Урал). *Региональная геология и металлогения*, **57**, 80-86.
- Новоселов К.А., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Артемьев Д.А. (2024) Детритовые хромшпинелиды Удоканского осадочного бассейна (Забайкалье). *Геология и геофизика*, **65**(5), 694-709. <https://doi.org/10.15372/GiG2023173>
- Озеров В.С. (1996) Метаморфизованные россыпи золота Приполярного Урала. *Руды и металлы*, (4), 28-37.
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2019) Палладий-золото-сульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал). *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (6), 20-27. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2022) Распад твердого раствора в системе Au-Ag-Cu в богатой золотом области. *Геохимия*, **67**(7), 639-654. <https://doi.org/10.31857/S0016752522060061>
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2023) Самородное золото Au-Pd месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия). *Геология и геофизика*, **64**(2), 233-254. <https://doi.org/10.15372/GiG2022122>
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2024) Минералы палладия и платины в рудах Au-Pd месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия). *Литосфера*, **24**(3), 526-546. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-526-546>
- Онищенко С.А., Соболева А.А. (2021) Апогипербазитовые метасоматиты поднятия Енганепэ (Полярный Урал). *Вестн. геонаук*, (3), 11-20. <https://doi.org/10.19110/geov.2021.3.2>
- Онищенко С.А., Пархачева К.Г., Глухов Ю.В., Кузнецов С.К., Никулова Н.Ю., Тропников Е.М. (2024) Распад твердых растворов в области Au-Au<sub>3</sub>Cu и уточнение фазовой диаграммы Au-Ag-Cu. *Геохимия*, **69**(11), 1012-1021. <https://doi.org/10.31857/S0016752524110048>
- Павлова А.А. (2011) Цинковые хромшпинелиды в осадочно-терригенных породах участка Палеодолинный северо-восточного контакта гранитного массива Мань-Хамбо (Приполярный Урал). *Разведка и охрана недр*, (1), 25-28.
- Пеков И.В., Чуканов Н.В., Румянцева Е.В., Кабалов Ю.К., Шнайдер Ю., Леденева Н.В. (2000) Хромсаладонит  $\text{KCrMg}[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$  – новый минерал из группы слюд. *Зап. ВМО*, **129**(1), 38-44.
- Попов В.А., Попова В.И., Блинов И.А. (2017) Минеральные ассоциации и состав акцессорного магнетита Вишневогорского щелочного комплекса на Южном Урале. *Минералогия*, **3**(4), 3-11.
- Резницкий Л.З., Скляр Е.В., Бараш И.Г. (2023) Ванадиево-хромовые метаморфические шпинели (слюдянский комплекс, Южное Прибайкалье). Железистые шпинели. *Геология и геофизика*, **64**(4), 494-515. <https://doi.org/10.15372/GiG2022118>
- Резницкий Л.З., Скляр Е.В., Бараш И.Г. (2024) Ванадиево-хромовые метаморфические шпинели (слюдянский комплекс, Южное Прибайкалье). Магнезиальные шпинелиды. *Геология и геофизика*, **65**(6), 805-822. <https://doi.org/10.15372/GiG2023209>
- Резницкий Л.З., Скляр Е.В., Ушаповская З.Ф., Нартова Н.В., Евсюнин В.Г., Кашаев А.А., Суворова Л.Ф. (1997) Хромфиллит  $\text{KCr}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$  – новая

- диоктаэдрическая слюда. *Зан. ВМО*, (2), 110-119.
- Силаев В.И., Голубева И.И., Хазов А.Ф., Тихомирова В.Д., Филиппов В.Н., Кузнецов Н.В., Белоусова Е.А. (2010) Цинксодержащие и цинкистые хромшпинелиды: химизм и типоморфное значение. *Тр. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, вып. 126, 110-180.
- Спиридонов Э.М., Сидорова Н.В., Нурмухаметов Ф.М., Коротаева Н.Н., Куликова И.М., Поленов Ю.А., Трошкина А.Н. (2014) Лиственитоподобные апопикритовые флогопит-магнезитовые гумбеиты Березовского месторождения золота с цирконом, монацитом, ксенотимом, фторапатитом, турмалином, реликтовым цинкохромитом. *Урал. геол. журн.*, **97**(1), 20-67.
- Тарбаев М.Б., Кузнецов С.К., Моралев Г.В., Соболева А.А., Лапутина И.П. (1996) Новый золото-палладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала (Россия). *Геология руд. месторождений*, **38** (1), 15-30.
- Татаринов А.В., Кизияров Г.П., Завьялова Л.Л., Брандт С.Б. (1980) Рудные минералы и особенности происхождения жадеитов и нефритов в ультрабазитах Сибири. *Докл. АН*, **250**(2), 434-438.
- Alwmark C., Schmitz B. (2007) Extraterrestrial chromite in the resurge deposits of the early Late Ordovician Lockne crater, central Sweden. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **253**(1-2), 291-303. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.10.034>
- Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Gieré R., Heuss-Assbisher S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero M. (2006) Recommended nomenclature of epidote group minerals. *Eur. J. Miner.*, **18**, 551-567. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2006/0018-0551>
- Barnes S.J. (2000) Chromite in komatiites. II. Modification during greenschist to mid-amphibolite facies metamorphism. *J. Petrol.*, **41**(3), 387-409.
- Béziat D., Monchoux P. (1991) Les spinelles chromozincifères du district aurifère de Salsigne (Montagne Noire, France). *Eur. J. Miner.*, **3**(6), 957-969.
- Biagioni C., Pasero M. (2014). The systematics of the spinel-type minerals: an overview. *Am. Miner.*, **99**, 1254-1264. <https://doi.org/10.2138/am.2014.4816>
- Bjerg E.A., Brodtkorb M.K. de, Stumpf E.F. (1993) Compositional zoning in Zn-chromites from the Cordillera Frontal Range, Argentina. *Miner. Mag.*, **57** (386), 131-139.
- Bosi F., Biagioni C., Pasero M. (2019) Nomenclature and classification of the spinel supergroup. *Eur. J. Miner.*, **31**(1), 183-192. <https://doi.org/10.1127/ejm/2019/0031-2788>
- Challis G.A., Grapes R., Palmer K. (1995) Chromian muscovite, uvarovite, and zincian chromite: products of regional metasomatism in Northwest Nelson, New Zealand. *Canad. Miner.*, **33**(6), 1263-1284.
- Donohue C.L., Essene E.J. (2005) Granulite-facies conditions preserved in vanadium- and chromium-rich metapelites from the Paradise Basin, Wind River Range, Wyoming, U.S.A. *Canad. Miner.*, **43**(1), 495-511.
- Fanlo I., Gervilla F., Colas V., Subias I. (2015) Zn-, Mn- and Co-rich chromian spinels from the Bou-Azzer mining district (Morocco): Constraints on their relationship with the mineralizing process. *Ore Geol. Rev.*, **71**, 82-98. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.006>
- Figueiras J., Waerenborgh J.C. (1997) Fully oxidized chromite in the Serra Alta (South Portugal) quartzites: chemical and structural characterization and geological implications. *Miner. Mag.*, **61**(408), 627-638. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.408.02>
- Gahlan H.A., Arai S. (2007) Genesis of peculiarly zoned Co, Zn and Mn-rich chromian spinel in serpentinite of Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco. *J. Miner. Petrol. Sci.*, **102**, 69-85. <https://doi.org/10.2465/jmps.060212>
- Groves D.I., Barret F.M., Binns R.A., McQueen K.G. (1977) Spinel Phases Associated with Metamorphosed Volcanic-Type Iron-Nickel Sulfide Ores from Western Australia. *Econ. Geol.*, **72**, 1224-1244.
- Hatert F., Burke E. (2008) The IMA-CNMNC dominant-constituent rule revisited and extended. *Canad. Miner.*, **46**(3), 717-728. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.3.717>
- Heimann A., Spry P.G., Teale G.S. (2005) Zincian spinel associated with metamorphosed Proterozoic base-metal sulphide occurrences, Colorado: A re-evaluation of gahnite composition as a guide in exploration. *Canad. Miner.*, **43**(2), 601-622. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.2.601>
- Johan Z., Ohnenstetter D. (2010) Zincochromite from the Guaniamo river diamondiferous placers, Venezuela: evidence of its metasomatic origin. *Canad. Miner.*, **48**(2), 361-374. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.2.361>
- Levy D., Diella V., Pavese A., Dapiaggi M., Sani A. (2005) P-V equation of State, thermal expansion, and P-T stability of synthetic zincochromite (ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel). *Amer. Miner.*, **90**(7), 1157-1162. <https://doi.org/10.2138/am.2005.1755>
- Liipo J.P., Vuollo J.I., Nykänen V.M., Piirainen T.A. (1995) Zoned Zn-rich chromite from the Näätäniemi serpentinite massif, Kuhmo greenstone belt, Finland. *Canad. Miner.*, **33**(3), 537-545.
- Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. (2021) Native Gold in the Chudnoe Au-Pd-REE Deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, Minerals in Intergrowth and Genesis. *Minerals*, **11**, 451. <https://doi.org/10.3390/min11050451>
- Palyanova G.A., Zhegunov P.S., Beliaeva T.V., Murzin V.V., Borovikov A.A., Goryachev N.A. (2023) Palladian Gold: Chemical Composition, Minerals in Association, and Physicochemical Conditions of Formation at Different Types of Gold Deposits. *Minerals*, **13**, 1019. <https://doi.org/10.3390/min13081019>
- Staddon L.G., Parkinson I.J., Cavosie A.J., Elliott T., Valley J.W., Fournelle J., Kemp A., Shirey S.B. (2021) Detrital chromite from Jack Hills, Western Australia: signatures of metamorphism and constraints on provenance. *J. Petrol.*, **62**(12), 1-30. <https://doi.org/10.1093/petrology/egab052>
- Stoddard E.F. (1979) Zinc-rich hercynite in high-grade metamorphic rocks: a product of the dehydration of staurolite. *Amer. Miner.*, **64**, 736-741.
- Svetov S.A., Chazhengina S.I., Singh V.K., Rybnikova Z.P., Mishra S. (2019) Accessory zoned chromite from archaean komatiites of the Karelian craton, Russia: metamorphic fingerprints. *Zap. RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, **148**(4), 80-94. <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1484.06>
- Taguchi T., Satish-Kumar M., Hokada T., Jayananda M. (2012) Petrogenesis of Cr-rich calc-silicate rocks from the Bandihalli supracrustal belt, Archaean Dharwar craton, India. *Canad. Miner.*, **50**(3), 705-718. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.3.705>



org/10.3749/canmin.50.3.705

- Tajčmanová L., Konopásek J., Košler J. (2009) Distribution of zinc and its role in the stabilization of spinel in high-grade felsic rocks of the Moldanubian domain (Bohemian Massif) *Eur. J. Miner.*, **21**, 407-418. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2009/0021-1899>
- Treloar P.J. (1987) The Cr-minerals of Outokumpu – their chemistry and significance. *J. Petrol.*, **28**(5), 867-886. <https://doi.org/10.1093/petrology/28.5.867>
- Valentino A.J., Carvalho A.V., Sclar C.B. (1990) Franklinite-magnetite-pyrophanite intergrowths in the Sterling Hill zinc deposit, New Jersey. *Econ. Geol.*, **85**(8), 1941-1946. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.8.1941>
- Von Knorring O., Condiliffe E., Tong Y.L. (1986) Some mineralogical and geochemical aspects of chromium-bearing skarn minerals from northern Karelia, Finland. *Bull. Geol. Soc. Finl.*, **58**(1), 277-292.
- Weiser Th.W., Hirdes W. (1997) Zinc-rich chromite from Paleoproterozoic conglomerates at Tarkwa gold mine, Ghana. *Canad. Miner.*, **35**, 587-595.
- Wylie A.G., Candela P.A., Burke T.M. (1987) Compositional zoning in unusual Zn-rich chromite from the Sykesville district of Maryland and its bearing on the origin of “feritchromit”. *Amer. Miner.*, **72**(3-4), 413-422.
- Alwmark C., Schmitz B. (2007) Extraterrestrial chromite in the resurge deposits of the early Late Ordovician Lockne crater, central Sweden. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **253**(1-2), 291-303. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.10.034>
- Andreichev V.L. (2010) Geochronology of granitoid magmatism of Subpolar Urals. *Vestn. IG Komi NTs UrO RAN*, (11), 7-12. (In Russ.)
- Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Gieré R., Heuss-Assbischler S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero M. (2006) Recommended nomenclature of epidote group minerals. *Eur. J. Miner.*, **18**, 551-567. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2006/0018-0551>
- Barnes S.J. (2000) Chromite in komatiites. II. Modification during greenschist to mid-amphibolite facies metamorphism. *J. Petrol.*, **41**(3), 387-409.
- Béziat D., Monchoux P. (1991) Les spinelles chromozincifères du district aurifère de Salsigne (Montagne Noire, France). *Eur. J. Miner.*, **3**(6), 957-969.
- Biagioni C., Pasero M. (2014). The systematics of the spinel-type minerals: an overview. *Am. Miner.*, **99**, 1254-1264. <https://doi.org/10.2138/am.2014.4816>
- Bjerg E.A., Brodtkorb M.K. de, Stumpfl E.F. (1993) Compositional zoning in Zn-chromites from the Cordillera Frontal Range, Argentina. *Miner. Mag.*, **57**(386), 131-139.
- Bosi F., Biagioni C., Pasero M. (2019) Nomenclature and classification of the spinel supergroup. *Eur. J. Miner.*, **31**(1), 183-192. <https://doi.org/10.1127/ejm/2019/0031-2788>
- Challis G.A., Grapes R., Palmer K. (1995) Chromian muscovite, uvarovite, and zincian chromite: products of regional metasomatism in Northwest Nelson, New Zealand. *Canad. Miner.*, **33**(6), 1263-1284.
- Donohue C.L., Essene E.J. (2005) Granulite-facies conditions preserved in vanadium- and chromium-rich metapelites from the Paradise Basin, Wind River Range, Wyoming, U.S.A. *Canad. Miner.*, **43**(1), 495-511.
- Ermolaeva V.N., Chukanov N.V., Janchev S., Van K. (2016) Endogenic oxide parageneses with chalcophile elements in the orogenic zone related to the “Mixed Series” of the Pelagonian massif, Republic of Macedonia. *Novye Dannye o Mineralakh*, (51), 12-19. (In Russ.)
- Fanlo I., Gervilla F., Colas V., Subias I. (2015) Zn-, Mn- and Co-rich chromian spinels from the Bou-Azzer mining district (Morocco): Constraints on their relationship with the mineralizing process. *Ore Geol. Rev.*, **71**, 82-98. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.006>
- Figueiras J., Waerenborgh J.C. (1997) Fully oxidized chromite in the Serra Alta (South Portugal) quartzites: chemical and structural characterization and geological implications. *Miner. Mag.*, **61**(408), 627-638. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.408.02>
- Gahlan H.A., Arai S. (2007) Genesis of peculiarly zoned Co, Zn and Mn-rich chromian spinel in serpentinite of Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco. *J. Miner. Petrol. Sci.*, **102**, 69-85. <https://doi.org/10.2465/jmps.060212>
- Glukhov Yu.V., Makeev B.A., Varlamov D.A., Shevchuk S.S., Isaenko S.I. (2015) Chromespinelides with zinc-bearing epigene rims from Devonian conglobreccia horizons of Ichet’yu placer-like occurrence (Middle Timan). *Lithosphere (Russia)*, (2), 103-120. (In Russ.)
- Groves D.I., Barret F.M., Binns R.A., McQueen K.G. (1977) Spinel Phases Associated with Metamorphosed Volcanic-Type Iron-Nickel Sulfide Ores from Western Australia. *Econ. Geol.*, **72**, 1224-1244.
- Hatert F., Burke E. (2008) The IMA-CNMNC dominant-constituent rule revisited and extended. *Canad. Miner.*, **46**(3), 717-728. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.3.717>
- Heimann A., Spry P.G., Teale G.S. (2005) Zincian spinel associated with metamorphosed Proterozoic base-metal sulphide occurrences, Colorado: A re-evaluation of gahnite composition as a guide in exploration. *Canad. Miner.*, **43**(2), 601-622. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.2.601>
- Ivanov V.V., Ulyanov A.K., Shabelskaya N.P. (2013) Ferrites-chromites of transition elements: synthesis, structure, properties. Moscow, Izdatel’skii dom Akademii estestvoznaniya, 94 p. (In Russ.)
- Johan Z., Ohnenstetter D. (2010) Zincchromite from the Guaniamo river diamondiferous placers, Venezuela: evidence of its metasomatic origin. *Canad. Miner.*, **48**(2), 361-374. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.2.361>
- Kozlov A.V., Korznikov V.D., Smolensky V.V., Kuznetsov S.K., Savichev A.A., Ivanov A.S., Vasiliev E.A. (2024) Problems of Dating the Au-Pd Mineralization of the Chudnoye Deposit (the Subpolar Urals). *Zap. RMO*, **153**(3), 42-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869605524030036>
- Kozyreva I.V., Shvetsova I.V. (2007) Discovery of a rare mineral ganite in diaspore- pyrophyllite shales of the Subpolar Urals. *Geodynamics, magmatism, sedimentogenesis, and minerageny of Northwestern Russia. Proceedings of the All-Russian Conf.* (Ed. by A.I. Golubev). Petrozavodsk, IG KaRNTs RAN, 176-178. (In Russ.)
- Kozyreva I.V., Yudovich Ya.E., Shvetsova I.V., Ketris M.P., Efanova L.I. (2003) The aluminous and ferriiferous rocks of the Near-Polar Urals. Ekaterinburg, UrO RAN, 101 p. (In Russ.)
- Kuznetsov S.K., Andreichev V.L. (1998) The age of gold-fuchsite mineralization in the rhyolites of the Maldynyrd ridge. *Gold, platinum and diamonds of the Komi Repub-*

- lic and adjacent regions. Proceedings of the All-Russian Conf. (Ed. by N.P. Yushkin). Syktyvkar, Geoprint Publ., 18-19. (In Russ.)
- Levy D., Diella V., Pavese A., Dapiaggi M., Sani A. (2005) P-V equation of State, thermal expansion, and P-T stability of synthetic zincochromite ( $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$  spinel). *Amer. Miner.*, **90**(7), 1157-1162. <https://doi.org/10.2138/am.2005.1755>
- Liipo J.P., Vuollo J.I., Nykänen V.M., Piirainen T.A. (1995) Zoned Zn-rich chromite from the Näätäniemi serpentinite massif, Kuhmo greenstone belt, Finland. *Canad. Miner.*, **33**(3), 537-545.
- Makeev A.B., Makeev B.A. (2005) Zn-Chromspinel of Middle Timan and Near-Polar Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **404**(7), 1078-1083 (translated from *Dokl. AN*, **404**(2), 235-240).
- Moralev G.V., Borisov A.V., Surenkov S.V., Tarbaev M.B., Ponomarchuk V.A. (2005) The first  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -dating of micas from the Chudnoe Au-Pd-REE occurrence, Near-Polar Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **400**(2), 109-112 (translated from *Dokl. AN*, **400**(2), 243-246).
- Murzin V.V., Varlamov D.A., Zamyatina D.A. (2017) Epigenetic transformations of chromspinelide in the process of rodingitization and nephritization at the Agardag gold deposit (South Tuva). *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 164, 227-231. (In Russ.)
- Nesterov A.R., Rumyantseva Y.V. (1987) Zincochromite,  $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$  – a new mineral from Karelia. *Zap. VMO*, **116**(3), 367-371. (In Russ.)
- Nikulova N.Yu., Filippov V.N., Shvetsova I.V. (2014) Possible sources of ore minerals in Lower Paleozoic psephytes in the headwaters of the Malaya Kara River (Polar Urals). *Regional'naya Geologiya i Metallogeniya*, **57**, 80-86. (In Russ.)
- Novoselov K.A., Belogub E.V., Blinov I.A., Artemyev D.A. (2024) Detrital chrome spinels of the Udokan sedimentary basin in Transbaikalia. *Rus. Geol. Geophys.*, **65**(5), 609-522 (translated from *Geol. Geofiz.*, **65**(5), 694-709). <https://doi.org/10.2113/RGG20234632>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2019) Palladium-gold-sulphide mineralization in andesites at Chudnoe deposit (Subpolar Urals). *Vestn. IG Komi NTs UrO RAN*, (6), 20-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-6-20-27>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2022) Exsolution in the Au–Ag–Cu System in a Gold-Rich Area. *Geochem. Int.*, **60**(7), 657-671 (translated from *Geochimiya*, **67**(7), 639-654). <https://doi.org/10.1134/S0016702922060064>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2023) Native Gold of the Chudnoe Gold–Palladium Deposit (Subpolar Urals, Russia). *Rus. Geol. Geophys.*, **64**(2), 192-209 (translated from *Geol. Geofiz.*, **64**(2), 233-254). <https://doi.org/10.2113/RGG20214452>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2024) Palladium and platinum minerals in Au-Pd ores of the Chudnoe deposit (Subpolar Urals, Russia). *Lithosphere (Russia)*, **24**(3), 526-546. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-526-546>
- Onishchenko S.A., Soboleva A.A. (2021) Apoultramafic metasomatites of the Enganepe Uplift (the Polar Urals). *Vestn. geonauk*, (3), 11-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.19110/geov.2021.3.2>
- Onishchenko S.A., Parkhacheva K.G., Glukhov Yu.V., Kuznetsov S.K., Nikulova N.Yu., Tropnikov E.M. (2024) Exsolution in the Au–Ag–Cu Region and Correction of the Au–Ag–Cu Phase Diagram. *Geochem. Int.*, **62**(11), 1174-1183 (translated from *Geochimiya*, **69**(11), 1012-1021) <https://doi.org/10.1134/S0016702924700642>
- Ozerov V.S. (1996) Metamorphosed gold placers of the Subpolar Urals. *Rudy i Metally*, (4), 28-37. (In Russ.)
- Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. (2021) Native Gold in the Chudnoe Au-Pd-REE Deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, Minerals in Intergrowth and Genesis. *Minerals*, **11**, 451. <https://doi.org/10.3390/min11050451>
- Palyanova G.A., Zhegunov P.S., Beliaeva T.V., Murzin V.V., Borovikov A.A., Goryachev N.A. (2023) Palladian Gold: Chemical Composition, Minerals in Association, and Physicochemical Conditions of Formation at Different Types of Gold Deposits. *Minerals*, **13**, 1019. <https://doi.org/10.3390/min13081019>
- Pavlova A.A. (2011) Zinc chrome spinelides in sedimentary-terrigenous rocks of the Paleodolinsky site of the north-eastern contact of the Man-Hambo granite massif (Subpolar Urals). *Razvedka i Okhrana Nedr*, (1), 25-28. (In Russ.)
- Pekov I.V., Chukanov N.V., Rumiantseva E.V., Kabanov Yu.K., Schneider Yu., Ledeneva N.V. (2000) Chromceladonite  $\text{KCrMg}[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$  – a new mineral of the mica group. *Zap. VMO*, **129**(1), 38-44. (In Russ.)
- Popov V.A., Popova V.I., Blinov I.A. (2017) Mineral assemblages and composition of accessory magnetite of the Vishnevogorsky alkaline complex (South Urals). *Mineralogiya*, **3**(4), 3-11. (In Russ.)
- Reznitsky L.Z., Sklyarov E.V., Barash I.G. (2023) Metamorphic vanadium-chromium spinel (Sludyanka Complex, South Baikal area). Ferroan spinel. *Rus. Geol. Geophys.*, **64**(4), 407-423 (translated from *Geol. Geofiz.*, **64**(4), 494-515). <https://doi.org/10.2113/RGG20224473>
- Reznitsky L.Z., Sklyarov E.V., Barash I.G. (2024) Metamorphic vanadium-chromium spinel (Sludyanka Complex, South Baikal area). Magnesian spinel. *Rus. Geol. Geophys.*, **65**(6), 699-713 (translated from *Geol. Geofiz.*, **65**(6), 805-822). <https://doi.org/10.2113/RGG20234659>
- Reznitsky L.Z., Sklyarov E.V., Ushchapovskaya Z.F., Nartova N.V., Evsyunin V.G., Kashaev A.A., Suvorova L.F. (1997) Chromfillite  $\text{KCr}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$  – a new dioctahedral mica. *Zap. VMO*, (2), 110-119. (In Russ.)
- Silaev V.I., Golubeva I.I., Khazov A.F., Tikhomirova V.D., Filippov V.N., Kuznetsov N.V., Belousova E.A. (2010) Zinc-containing chrome spinelides: chemistry and typomorphic significance. *Tr. IG Komi NTs UrO RAN*, vyp. 126, 110-180. (In Russ.)
- Spiridonov E.M., Sidorova N.V., Nurmuchametov F.M., Korotaeva N.N., Kulikova I.M., Polenov Y.A., Troshkina A.N. (2014) Listvenite-like apopicitic phlogopite-magnetite gumbites of the Beresovskoe gold deposit with zircon, monazite, xenotime, fluorapatite, tourmaline, relic zincochromite. *Ural. Geol. Zhurn.*, **97**(1), 20-67. (In Russ.)
- Staddon L.G., Parkinson I.J., Cavosie A.J., Elliott T., Valley J.W., Fournelle J., Kemp A., Shirey S.B. (2021) Detrital chromite from Jack Hills, Western Australia: signatures of metamorphism and constraints on provenance. *J. Petrol.*, **62**(12), 1-30. <https://doi.org/10.1093/petrology/egab052>
- Stoddard E.F. (1979) Zinc-rich hercynite in high-grade metamorphic rocks: a product of the dehydration of stau-

- rolite. *Amer. Miner.*, **64**, 736-741
- Svetov S.A., Chazhengina S.I., Singh V.K., Rybnikova Z.P., Mishra S. (2019) Accessory zoned chromite from archaean komatiites of the Karelian craton, Russia: metamorphic fingerprints. *Zap. RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, **148**(4), 80-94. <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1484.06>
- Taguchi T., Satish-Kumar M., Hokada T., Jayananda M. (2012) Petrogenesis of Cr-rich calc-silicate rocks from the Bandihalli supracrustal belt, Archean Dharwar craton, India. *Canad. Miner.*, **50**(3), 705-718. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.3.705>
- Tajčmanová L., Konopásek J., Košler J. (2009) Distribution of zinc and its role in the stabilization of spinel in high-grade felsic rocks of the Moldanubian domain (Bohemian Massif) *Eur. J. Miner.*, **21**, 407-418. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2009/0021-1899>
- Tarbaev M.B., Kuznetsov S.K., Moralev G.V., Soboleva A.A., Laputina I.P. (1996) A new gold-palladium type of mineralization in the Kozhim region of the Circumpolar Urals (Russia). *Geol. Ore Depos.*, **38**(1), 11-25 (translated from *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **38**(1), 15-30).
- Tatarinov A.V., Kiziyarov G.P., Zavyalova L.L., Brandt S.B. (1980) Ore minerals and features of the origin of jadeites and nephrites in the ultrabasic rocks of Siberia. *Dokl. AN*, **250**(2), 434-438. (In Russ.)
- Treloar P.J. (1987) The Cr-minerals of Outokumpu – their chemistry and significance. *J. Petrol.*, **28**(5), 867-886. <https://doi.org/10.1093/petrology/28.5.867>
- Valentino A.J., Carvalho A.V., Sclar C.B. (1990) Franklinite-magnetite-pyrophanite intergrowths in the Sterling Hill zinc deposit, New Jersey. *Econ. Geol.*, **85**(8), 1941-1946. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.8.1941>
- Von Knorring O., Condcliffe E., Tong Y.L. (1986) Some mineralogical and geochemical aspects of chromium-bearing skarn minerals from northern Karelia, Finland. *Bull. Geol. Soc. Finl.*, **58**(1), 277-292.
- Weiser Th.W., Hirdes W. (1997) Zinc-rich chromite from Paleoproterozoic conglomerates at Tarkwa gold mine, Ghana. *Canad. Miner.*, **35**, 587-595.
- Wylie A.G., Candela P.A., Burke T.M. (1987) Compositional zoning in unusual Zn-rich chromite from the Sykesville district of Maryland and its bearing on the origin of "ferritchromit". *Amer. Miner.*, **72**(3-4), 413-422.