

Введение

Хромшпинелиды принадлежат к группе оксишпинели, подгруппе шпинели (шпинелидам) с общей формулой $A^{2+}B^{3+}_2O_4$. Двухвалентные катионы в подгруппе обычно представлены Fe^{2+} , Mg, Mn^{2+} , Zn, трехвалентные — Al, Cr, Fe^{3+} , V^{3+} , Mn^{3+} . Между конечными членами подгруппы наблюдаются многочисленные серии изоморфных замещений, проявляющиеся как между двухвалентными катионами, так и трехвалентными. Состав хромшпинелидов — обычных акцессорных минералов мафит-ультрамафитовых пород — описывается в основном изоморфной смесью конечных членов: магнезиохромит — хромит — герцинит — шпинель ($MgCr_2O_4$ — $FeCr_2O_4$ — $FeAl_2O_4$ — $MgAl_2O_4$).

Магматические хромшпинелиды при постмагматических и метаморфических процессах в той или иной степени замещаются вторичными хромшпинелидами и магнетитом. Довольно часто замещение происходит с образованием своеобразной зональности, в которой неизменное или малоизмененное ядро окружено каймами вторичных хромшпинелидов, среди которых преобладают разности, лишенные первичного магния, нередко обогащенные трехвалентным железом; внешняя кайма обычно сложена магнетитом. Нередко процесс замещения сопровождается повышением концентрации Zn и Mn как в каймах, так и в ядрах до содержаний, намного превышающих содержания этих элементов в первичных магматогенных шпинелях. Обычный уровень содержания ZnO в хромшпинелидах базит-гипербазитовых пород, не затронутых постмагматическими изменениями, невысокий. Предельный уровень концентрации ZnO в шпинелях неизменных магматических пород большинством исследователей оценивается в 1 мас. % (Wylie et al., 1987; Makeev, 1992; Bjerg et al., 1993; Liipo et al., 1995; Barnes, 2000; Силаев и др., 2010; Svetov et al., 2019; Резницкий и др., 2023 и др.).

Zn-Cr-содержащие шпинелиды распространены в метасоматитах по базит-ультрабазитам (лиственитах, родингитах, скарноподобных образованиях, жадеититах, нефритоидах, актинолититах) и в сопутствующих гидротермально-метасоматических сульфидных рудах (Von Knorring et al., 1986; Wylie et al., 1987; Gahlan, Arai, 2007; Fanlo et al., 2015; Мурзин и др., 2017; Онищенко, Соболева, 2021). Собственно цинкохромит $ZnCr_2O_4$ был открыт в Cr-V-содержащих слюдистых метасоматитах уран-ванадиевого месторождения Средняя Падма в Южной Карелии. Цинкохромит образует мелкие (2—10, изредка 40—50 мкм) идиоморфные кристаллы, содержит 37.05 мас. % ZnO и 53.30 мас. % Cr_2O_3 (Нестеров, Румянцева, 1987). Цинкохромит отмечен на Березовском золоторудном месторождении на Урале (Спиридонов, 2014), Zn-Cr-содержащие шпинелиды ряда цинкохромита — ганита присутствуют на колчеданном

месторождении Оутокумпу в Финляндии (Treloar et al., 1987).

В метаморфизованных осадочных горных породах распространены детритовые Zn-содержащие хромшпинелиды. Обогащение цинком могло быть связано с преобразованием зерен магматогенных хромшпинелидов при метаморфизме пород, но возможно также поступление хромшпинелидов в осадочный бассейн уже в обогащенном цинком виде.

Zn-содержащие хромшпинелиды изучены в метапелитах округа Сайксвилл (штат Мэриленд, США). Наиболее высокие содержания ZnO (до 19.05 мас. %) — в центральных частях зерен (Wylie et al., 1987). В нижнепалеозойских Cr-содержащих кварцитах и биотитовых сланцах на северо-западе Нельсона (Новая Зеландия) Zn-содержащие хромшпинелиды (до 13.7 мас. % ZnO) ассоциируют с фукситом, уваровитом и Cr-содержащим рутилом (Challis et al., 1995).

В обогащенных тяжелыми минералами слоях кварцитов в докембрийских золотоносных конгломератах месторождения Тарква в Гане зерна хромшпинелидов размером до 200 мкм заключены в кристаллах магнетита. Хромшпинелиды содержат в среднем 13.3 (до 19.4) мас. % ZnO при отсутствии магния (Weiser, Hirdes, 1997). В архейских (гадейских) кварцитах и метаконгломератах Джек-Хиллз (кратон Йилгарн, Западная Австралия) детритовые хромшпинелиды, тесно ассоциирующие с фукситом, содержат до 13 мас. % ZnO и до 4.4 мас. % MnO (Staddon et al., 2021). В архейских метаконгломератах западной части Индийского щита окатанные глиноземистые хромшпинелиды содержат (мас. %): ZnO — от 7.1 до 15.5, MnO — до 2.55, MgO — до 0.18 (Pal et al., 2022).

Детритовые хромшпинелиды найдены в метапесчаниках Удоканского осадочного бассейна (Забайкалье). Они образуют реликтовые включения в кристаллах магнетита, содержат до 11.6 мас. % ZnO и до 6.3 мас. % MnO при практически полном отсутствии MgO (Новоселов и др., 2024). Детритовые хромшпинелиды присутствуют в полосчатых фукситсодержащих ильменит-гематитовых кварцевых песчаниках в юго-восточной части Восточного Саяна. Хромшпинелиды содержат 12—27 мас. % ZnO при практически полном отсутствии MgO (Киселева и др., 2025).

Zn-содержащие хромшпинелиды на Приполярном и Полярном Урале обнаружены в терригенных породах основания палеозойской части разреза: в метапесчаниках алькесвожской свиты, в гравелитах предположительно саранхапнерской свиты (Павлова, 2011), в конглобрекциях в верховьях реки Малая Кара (Никулова и др., 2014), в песчаниках манитанырдской серии на восточном склоне поднятия Енганепэ (Никулова и др., 2018).

Zn-Mn-содержащие хромшпинелиды в метапесчаниках алькесвожской свиты встречаются в виде мелких зерен (0.15—0.3 мм) с 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—3.5, Cr₂O₃ — 45.5—62.7, Al₂O₃ — 0.5—15.7, Fe₂O₃ — 0—6.7, TiO₂ — 0—0.13, V₂O₅ — 0—0.4. Зерна с наиболее высокими содержаниями цинка соответствуют цинкохромиту (Юдович и др., 1997; Макеев и др., 1999; Макеев, Макеев, 2005).

Целью исследования является установление закономерностей преобразования детритовых хромшпинелидов при метаморфизме пород алькесвожской свиты.

Геологический очерк

Район находится на западном склоне Приполярного Урала в бассейне р. Кожым. В геологическом отношении он находится в пределах Центрально-Уральского поднятия и приурочен к северной части крупной геологической структуры — Ляпинского антиклинория (рис. 1). Наиболее древние отложения представлены пуйвинской, хобеинской и мороинской свитами, в состав которых входят в основном слюдисто-кварцевые сланцы с линзами мраморов и кварцитов, хлорит-серицит-альбит-кварцевые сланцы, алевросланцы, метаалевролиты. Пуйвинская свита на карте представлена как среднерифейская, но есть основания считать ее верхнерифейской (Пыстин и др. 2022). Локально развиты эффузивные породы кислого и основного состава, относящиеся к саблегорской свите позднего рифея — раннего венда. На докембрийских образованиях с угловым и стратиграфическим несогласием залегают более молодые отложения. В виде узкой полосы и отдельных выходов прослеживаются кварцевые гравелиты и песчаники алькесвожской свиты позднего кембрия — раннего ордовика. Они сменяются ордовикскими отложениями: кварцитопесчаниками, конгломератами и гравелитами обеизской свиты, хлорит-серицит-кварцевыми сланцами и песчаниками саледской свиты, известняками и известковистыми сланцами кожимской свиты. Интрузивные образования представлены в основном гранитами поздневендско-раннекембрийского сальнеро-маньхамбовского комплекса, габбро, габбро-долеритами и диоритами парнукского комплекса ранневендского возраста. Все породы претерпели метаморфизм зеленосланцевой фации, при этом породы рифея в южной и юго-восточной части района были, видимо, метаморфизованы неоднократно.

Широко развиты кварцево-жильно-хрусталеносные месторождения, а также золотосульфидные, золотосульфидно-кварцевые, свинцово-цинковые, уран-серебряные, уран-медные, молибденовые и редкоземельные проявления.

Наиболее крупными рудными объектами являются Au-Pd-месторождение Чудное и Au-Pd-рудопоявление Нестеровское, тяготеющие к межформационной границе двух крупнейших тектонических комплексов: рифей-вендского (доуралиды) и палеозойского (уралиды). В этих объектах присутствует Cr-содержащая минерализация, происхождение которой в риолитах месторождения Чудное пока не находит объяснения.

Отложения алькесвожской свиты, залегающие в основании палеозойского чехла, представлены конгломератами, гравелитами, песчаниками и алевросланцами; в породах отмечаются резкие фациальные переходы. В обломочной части пород преобладает кварц, цемент серицит-кварцевый, хлорит-серицит-кварцевый, иногда с пиррофиллитом. Структура цемента гранобластовая, бластопсаммитовая или бластопсефитовая, текстура сланцеватая. Второстепенные минералы, которыми заметно обогащены отдельные прослои, представлены гематитом, апоильменитовым лейкоксеном и аутигенным рутилом, на некоторых участках распространен хлоритоид. Гематит образует уплощенные зерна размером от мельчайших чешуек до пластинок длиной 1 мм. Магнетит наблюдается только в базальном горизонте свиты, выше по разрезу он исчезает, уступая место гематиту. Акцессорные минералы — циркон, турмалин, апатит, монацит, ксенотим, алланит, спессартин, пьомонит, эпидот, титанит, лазулит, флоренсит, горсейксит, эвклаз. Сульфиды (пирит, халькопирит) для алькесвожской свиты не характерны и присутствуют в небольшом количестве только в базальном горизонте (Озеров, 1996; Юдович и др., 1998; Ефанова, Повонская, 1999).

К терригенным отложениям алькесвожской свиты приурочено Au-Pd-рудопоявление Нестеровское, представленное вкрапленностью золота, концентрирующегося в виде лентовидных или линзовидных скоплений. На наиболее деформированных участках распределение золота контролируется плоскостями срывов, сланцеватостью, шарнирами складок волочения, искажающими и нередко затушевывающими первичное его распределение. Наиболее богатые руды выявлены в участках осветления или, реже, фукситизации пород. Окатанных частиц золота нет, все золото метаморфизованное. В сростании с золотом отмечаются Pd-минералы — атенеит и мертиит (Ефанова и др., 1999; Ефанова, Юдович, 2002).

Материал и методы исследований

Текстурно-структурные особенности пород алькесвожской свиты изучались в керне скважин, полотно канав и коренных обнажениях на обширной площади в районе рудопоявления Нестеровское и на руч. Быстрый (рис. 1).

Хромсодержащие минералы в составе алькесвожской свиты играют скромную роль, однако привлекают к себе особое внимание в связи с тесной взаимосвязью золота с хромсодержащим мусковитом (фукситом) в риолитах месторождения Чудное, менее отчетливо эта связь проявлена в терригенных породах на рудопроявлении Нестеровское.

Характер распределения фуксита в породах определялся главным образом визуально благодаря его хорошо заметной зеленой окраске. Минеральный состав пород изучался при производстве поисково-оценочных работ¹ в петрографических шлифах (Е. А. Котельникова) и концентратах тяжелых минералов (Н. В. Повонская), полученных из измельченных до 1 мм проб. Пробы отбирались из керна скважин, полотна канав и в коренных обнажениях. Кроме того, изучались шлихи, полученные при промывке элювиально-делювиальных отложений. Полученные результаты в части распределения хромсодержащих минералов были учтены в настоящей работе.

Лабораторные исследования проведены на базе ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Cr-содержащие породы ручья Быстрого и рудопроявления Нестеровское изучались в полированных шлифах. Концентраты магнетита из керна буровых скважин (205136 и 206116) и шлиховой пробы 520602 монтировались в эпоксидной смоле, после чего изготавливались полированные препараты. В отраженном свете породы изучались с помощью оптического микроскопа Nikon Eclipse LV 100 ND. Исследование строения и состава минералов проводилось на электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMH с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (оператор Е. М. Тропников) и электронном микроскопе KYKY EM-6900 с энергодисперсионным спектрометром Xplore 30 Oxford Instruments (оператор В. А. Радаев). Напряжение 20 кВ, диаметр электронного зонда 1 мкм. Время набора спектров составляло 60—80 сек (600 тыс. импульсов). Эталоны — чистые металлы для Au, Ag, Fe, Cr, Zn, Ti, Mn и V, KBr для K, альбит для Na, волластонит для Ca, MgO для Mg, Al₂O₃ для Al. Погрешность определения в хромшпинелидах (мас. %): Al₂O₃ — 0.12, Cr₂O₃ — 0.17, MnO — 0.1, FeO — 0.17, ZnO — 0.2, погрешность определения в слюдах (мас. %): Al₂O₃ — 0.1, SiO₂ — 0.15, K₂O — 0.06, Cr₂O₃ — 0.06, FeO — 0.06. Полированный шлиф 751513 изучен А. В. Моховым (ИГЕМ РАН) на электронном микроскопе JSEM-5300 с энергодисперсионным спектрометром Link.

Расчет содержаний FeO и Fe₂O₃ в шпинелидах произведен по стехиометрии A²⁺B³⁺₂O₄ на 3 катиона и 4 кислорода.

Результаты

Хромсодержащие минералы в породах алькесвожской свиты распространены неравномерно и встречаются в двух геологических обстановках. В средних и верхних частях разреза свиты отмечаются участки фукситсодержащих пород (участок Альбовский, руч. Быстрый и рудопроявление Нестеровское), в которых изредка встречаются реликты хромшпинелида. В нижней части разреза в базальных гравелитах и конгломератах реликты хромшпинелида обнаружены в магнетите на рудопроявлении Нестеровское (скв. 205 и 206). Во всех обстановках первичным хромовым минералом в породах являлся детритовый хромшпинелид, но процессы и результаты его преобразования довольно сильно различаются.

Замещение хромшпинелида фукситом

Cr-содержащие породы видны визуально благодаря ярко-зеленой (изумрудной) окраске фуксита. Отмечено, что на участках разреза, где фуксит образует значительные, но размытые полосы и струи, хромшпинелид, как правило, отсутствует. Напротив, в мелких редких выделениях (глазках) фуксита насыщенного зеленого цвета устанавливается наличие хромшпинелида. Именно в таких ярко-зеленых обособлениях фуксита были обнаружены хромшпинелиды на участке Альбовский, оказавшиеся при последующем изучении Zn-Mn-содержащими (Юдович и др., 1997; Макеев и др., 1999; Макеев, Макеев, 2005).

Строение фуксит-хромшпинелидных образований нами изучено в гравелитах и песчаниках алькесвожской свиты (возможно, это нижняя часть обеизской свиты) на ручье Быстром, левом притоке р. Балбанью. В терригенных породах отмечены участки фукситсодержащих зеленых пород мощностью до 0.5 м. Распределение фуксита в них струйчатое или пятнистое (рис. 2, а, б), в ярко-зеленых струйках или пятнышках, сложенных почти мономинеральным агрегатом фуксита, выявлены реликты трещиноватых зерен Zn-Mn-содержащих хромшпинелидов. Изредка отмечаются фукситовые прожилки толщиной до 3 мм (рис. 2, с), что указывает на мобилизацию и переотложение хрома при метаморфических процессах.

Хромшпинелид замещается фукситом, в результате чего его зерна, имеющие первоначально размер около 0.2 мм, разобщены на отдельные фрагменты размером 20—40 мкм (рис. 3). Реликтовые хромшпинелиды являются Zn-Mn-содержащими, количество ZnO составляет 8.5—10.7 мас. %, MnO — 4.9—5.7 мас. %, характерно отсутствие MgO (табл. 1). Вариации состава в отдельно взятых зернах невелики, в разных образцах отмечаются некоторые различия в содержании Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Формула наиболее богатого цинком шпинелида — $Fe^{2+}_{0.52}Zn_{0.30}Mn_{0.18}Cr_{1.59}Al_{0.30}Fe^{3+}_{0.10}O_4$.

Содержание Cr_2O_3 в фуксите, замещающем хромшпинелид, варьирует. Наиболее высокое содержание Cr_2O_3 в слюде (5.0—5.9 мас. %) отмечается вблизи зерен хромшпинелида, уменьшаясь по периферии фукситового обособления до 0.2—0.8 мас. % Cr_2O_3 (рис. 3, b). Состав наиболее хромистого фуксита (мас. %): SiO_2 — 47.18, TiO_2 — 0.84, Al_2O_3 — 25.46, Cr_2O_3 — 5.86, FeO — 4.10, MgO — 1.83, CaO — 0.20, K_2O — 11.28, Na_2O — не обн., сумма — 96.75. На расстоянии 2—3 мм от фукситовых обособлений наличие хрома в слюде в цементирующей массе породы не фиксируется. В рутиле на периферии фуксит-хромшпинелидных образований Cr не обнаружен (рис. 3, b), в качестве примеси присутствует 0.4—0.5 мас. % FeO .

Первоначальные контуры зерен хромшпинелидов не сохранились, по балансу Cr_2O_3 можно заключить, что замещено примерно 70—80 % объема шпинелидов, хром которых зафиксирован в фуксите.

Значимые результаты получены при изучении рудовмещающих пород проявления Нестеровское, в которых фуксит отмечается преимущественно в виде мелких пятен, но в относительно более деформированных породах присутствуют фукситсодержащие участки линзовидной, линзовидно-пятнистой формы с нечеткими контурами. Мощность их 0.2—1 м, по простиранию прослеживаются на несколько метров. Распределение фуксита пятнисто-полосчатое, иногда им обогащены отдельные слойки мощностью 1—5 см, но нередко фукситсодержащие струйки толщиной 0.5—1 см контролируются плейчатостью, зонами смятий и срывов, что указывает на мобилизацию и переотложение хрома при метаморфических процессах. В некоторых случаях пути миграции Cr и Au совпадали, что приводило к образованию сростаний самородного золота с Cr-содержащими минералами (рис. 4, а).

При минералогических исследованиях фукситсодержащих пород реликтовый хромшпинелид не был обнаружен, видимо, он полностью замещен вторичными метаморфическими Cr-содержащими минералами, среди которых помимо фуксита присутствуют гематит, рутил и хлорит. Кроме того, в шлихе В-221 из элювиально-делювиальных отложений на платообразной поверхности проявления Нестеровское в обломках фуксита обнаружены мелкие (5—20 мкм) новообразованные идиоморфные кристаллики Zn-содержащего хромшпинелида, иногда в сростании с самородным золотом. Таким образом, в деформированных породах рудопроявления Нестеровское хром, высвободившийся при разложении детритовых хромшпинелидов, от которых никаких видимых следов не осталось, зафиксировался в аутигенно-метаморфогенных фуксите, гематите, рутиле, хлорите и Zn-содержащем хромшпинелиде.

Содержание Cr_2O_3 в фуксите в основном заключено в интервале 1—2 мас. %, в сростании с Zn-содержащим хромшпинелидом несколько выше (до 3.8 мас. %), содержание железа невысокое, почти постоянно отмечается примесь Na_2O (табл. 2).

Содержание Cr_2O_3 в гематите заметно выше, чем в фуксите, и достигает 7.0 мас. % (табл. 3). Для гематита характерна пластинчатая форма зерен (рис. 4, а). В некоторых случаях зерна Cr-содержащего гематита нарастают на детритовые зерна ильменита, нацело замещенные агрегатом рутила и гематита (рис. 4, б), причем в микрозернистом агрегате последних Cr также фиксируется: в гематитовой части — до 5.3 мас. % Cr_2O_3 , в рутиловой — до 2.0 мас. % Cr_2O_3 .

Рутил, помимо агрегатных скоплений по ильмениту, присутствует в фукситсодержащих породах в виде самостоятельных зерен неправильной формы размером около 0.1 мм. Обычное содержание Cr_2O_3 в рутиле 0.7—1.2 мас. %, другие примеси (мас. %): FeO — 0.2—1.9, Nb_2O_5 — до 0.7, реже встречается V_2O_5 — до 0.9.

Хлорит отмечается в фукситсодержащих породах в подчиненном количестве. Содержание Cr_2O_3 заключено в интервале 0.7—1.2 мас. %, отмечается примесь NiO до 0.4 мас. % (табл. 4).

В Zn-содержащем хромшпинелиде среди двухвалентных элементов преобладают Fe и Zn, вариации содержаний минералообразующих компонентов заключены в следующих пределах (мас. %): FeO — 14.8—18.1, ZnO — 14.4—18.1, MnO — 1.4—1.7, Cr_2O_3 — 42.4—45.7, Fe_2O_3 — 12.2—18.4, Al_2O_3 — 5.0—7.4 (табл. 5).

Замещение хромшпинелида магнетитом

В базальных гравелитах и конгломератах алькесвожской свиты на рудопроявлении Нестеровское в метаморфогенном магнетите присутствуют реликты хромшпинелидов, которые обнаруживаются при изучении магнитной фракции пород в полированных шлифах. Магнетит представлен октаэдрическими кристаллами и зернами угловатой формы размером 0.08—0.50 мм, частично замещенными гематитом. Реликты хромшпинелидов в кристаллах магнетита встречаются нечасто, детально изучен состав и строение 20 зерен. Реликты имеют изометричную или неправильную форму. Активное замещение хромшпинелида магнетитом приводит к его фрагментации, примесь Cr присутствует в магнетите вблизи реликтов хромшпинелида и не отмечается во внешних зонах кристаллов магнетита. Состав хромшпинелидов в различных зернах различается по содержанию Cr_2O_3 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 , изредка отмечается

примесь TiO_2 и V_2O_3 , среди двухвалентных компонентов преобладает FeO , во всех зернах заметную роль в составе играют ZnO и MnO . Содержания MnO невелики и заключены в интервале 1.7—3.6 мас. %. Содержания ZnO в хромшпинелидах, напротив, изменяются значительно как от зерна к зерну, так и в пределах одного зерна, минимальное содержание ZnO составляет 1.3, максимальное — 17.5 мас. %.

По общему составу и особенностям распределения элементов реликтовые хромшпинелиды разделяются на три группы. Первую группу составляют *безмагниевые хромшпинелиды* с относительно однородным распределением Zn . Вторую и третью группу составляют хромшпинелиды с неоднородным распределением элементов: *зерна зонального строения* с остаточными содержаниями MgO в центре зерен и высокими содержаниями ZnO по периферии и *Zn-содержащие хромшпинелиды глиноземистого состава*, замещаемые феррихромитом и хроммагнетитом.

Безмагниевые разности с относительно равномерным распределением Zn наиболее распространены среди реликтовых зерен хромшпинелидов. Содержание ZnO в отдельных зернах заключено в интервалах от 3.4—8.8 до 9.8—12.4 мас. %, остальных компонентов (мас. %): Cr_2O_3 — от 37.1—38.5 до 52.8—53.1, Al_2O_3 — от 5.0—5.1 до 12.6—12.8, Fe_2O_3 — от 3.0—3.6 до 18.8—19.6, FeO — от 19.9—23.8 до 26.7—27.5, MnO — от 1.7—1.9 до 3.1—3.5. Обращает на себя внимание значительное содержание Fe_2O_3 в некоторых хромшпинелидах, при этом они заметно не отличаются от других зерен по содержанию ZnO . Строение хромшпинелидов в этой группе довольно разнообразно, часто отмечается коррозия и разделение зерен на отдельные фрагменты, первоначальная форма детритовых зерен утрачивается (рис. 5). В некоторых случаях в магнетите присутствуют пластинки гематита, развивающиеся главным образом по трещинам отдельности (рис. 5, с—е).

Весьма сложную морфологию реликты хромшпинелида приобретают в результате совместного замещения магнетитом и хлоритом. Вместе с тем вариации состава хромшпинелида по данным 4-х определений невелики (мас. %): Cr_2O_3 — 42.0—42.2, Al_2O_3 — 12.6—12.8, Fe_2O_3 — 8.9—9.0, FeO — 26.0, MnO — 2.5, ZnO — 5.9—6.1, TiO_2 — 0.5. Содержание Cr_2O_3 в окружающем магнетите составляет 2.2—2.8 мас. % (рис. 5, а).

Существенные детали замещения хромшпинелида магнетитом выяснились при изучении зерна 205136_1 (рис. 5, б). Монолитная часть хромшпинелида содержит (мас. %): Cr_2O_3 — 46.6—47.2, Al_2O_3 — 12.8—13.0, Fe_2O_3 — 3.6—4.6, FeO — 20.5—23.8, MnO — 2.4—2.7, ZnO — 7.7—11.5. Наиболее высокое содержание Zn отмечено вблизи границы с магнетитом, состав хромшпинелида (мас. %): Cr_2O_3

— 46.4, Al_2O_3 — 12.6, Fe_2O_3 — 4.8, FeO — 19.9, MnO — 2.5, ZnO — 12.0, формула $\text{Fe}^{2+}_{0.60}\text{Zn}_{0.32}\text{Mn}_{0.08}\text{Cr}_{1.33}\text{Al}_{0.54}\text{Fe}^{3+}_{0.13}\text{O}_4$. Характер изменений на границе с магнетитом определен при анализе мелких реликтов хромшпинелида в магнетите. Таким образом установлено, что в зоне контакта в хромшпинелиде происходит очень значительная потеря Al_2O_3 и столь же значительное увеличение содержания трехвалентного железа при практически неизменном содержании Cr_2O_3 (мас. %): Cr_2O_3 — 44.9, Al_2O_3 — 2.5, Fe_2O_3 — 18.0, FeO — 21.6, MnO — 3.5, ZnO — 6.7; формула $\text{Fe}^{2+}_{0.70}\text{Zn}_{0.19}\text{Mn}_{0.11}\text{Cr}_{1.37}\text{Al}_{0.11}\text{Fe}^{3+}_{0.52}\text{O}_4$. Содержание Cr_2O_3 в магнетите на удалении 25 мкм от контакта с хромшпинелидом составляет 0.7—0.9 мас. %.

В некоторых случаях реликтовый хромшпинелид сохраняет относительно монолитное строение (рис. 5, е). Содержание компонентов равномерное по всему зерну (мас. %): Cr_2O_3 — 42.4—44.5, Al_2O_3 — 10.3—11.0, Fe_2O_3 — 9.2—11.2, FeO — 24.5—26.0, MnO — 2.1—2.3, ZnO — 6.2—6.5. Содержание ZnO незначительно увеличивается до 6.6—6.8 мас. % на границе с магнетитом (рис. 5, ф). Содержание Cr_2O_3 в магнетите на расстоянии 5 мкм от контакта с хромшпинелидом составляет 2.0 мас. %, уменьшаясь по мере удаления от контакта.

Среди безмагниевого хромшпинелидов более отчетливое увеличение содержания ZnO в периферической части отмечено в зерне 206116_3 (рис. 6). Хромшпинелид замещается магнетитом, магнетит, в свою очередь, замещается гематитом. Гематит развивается в магнетите в виде мелких пятен вдоль трещин, полностью окружает зерно хромшпинелида и глубоко проникает в него по прожилкам. Распределение ZnO в хромшпинелиде имеет слабо выраженный V-образный профиль. В центральной части с минимумом ZnO (мас. %): Al_2O_3 — 7.3—7.7, Cr_2O_3 — 49.0—52.3, Fe_2O_3 — 6.3—7.5, FeO — 22.3—22.8, MnO — 2.6—2.7, ZnO — 7.6—8.1. Обогащение цинком краевой части хромшпинелида сопровождается заметным уменьшением количества Cr_2O_3 и увеличением содержания Fe_2O_3 (мас. %): Al_2O_3 — 8.8, Cr_2O_3 — 43.3, Fe_2O_3 — 10.8, FeO — 19.6, MnO — 2.6, ZnO — 11.2, что соответствует увеличению содержания магнетитового минала с 9 до 15 мол. %. Гематит содержит 2.5—3.6 мас. % Cr_2O_3 в оторочке, окружающей хромшпинелид, и 7.2—7.4 мас. % Cr_2O_3 в прожилках гематита. Содержание Cr_2O_3 в магнетите составляет 0.4 мас. % (точки 1 и 20).

В зернах с ярко выраженным зональным распределением ZnO и наличием MgO в центральной части (рис. 7 и 8) наиболее отчетливо проявляются закономерности миграции элементов при преобразовании хромшпинелидов. Хром, мобилизованный из хромшпинелида, частично фиксировался в замещающем его магнетите, магний и двухвалентное железо замещались цинком. Следует указать, что зональное строение зерен хромшпинелидов не заметно ни в

отраженном свете, ни в отраженных электронах и выявляется только при профильном изучении состава минерала.

Распределение ZnO в хромшпинелиде имеет V-образный профиль (рис. 7). Максимальные содержания ZnO (до 8.4 мас. %) отмечены на фронте замещения магнетитом, минимальные (1.8 мас. %) — в центральной части зерна. Здесь же отмечено наличие MgO (0.8—1.0 мас. %), свидетельствующее, что первоначально хромшпинелид был Mg-содержащим. Вариации FeO составляют 24.1—29.5 мас. %. Содержание Zn связано обратной зависимостью с содержанием ($\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}$), Zn изоморфно замещает Fe^{2+} и Mg в структуре минерала (рис. 7, с). Формула наиболее бедного цинком шпинелида — $\text{Fe}^{2+}_{0.83}\text{Zn}_{0.04}\text{Mn}_{0.08}\text{Mg}_{0.05}\text{Cr}_{1.19}\text{Al}_{0.65}\text{Fe}^{3+}_{0.14}\text{Ti}_{0.01}\text{O}_4$, наиболее богатого цинком — $\text{Fe}^{2+}_{0.71}\text{Zn}_{0.22}\text{Mn}_{0.08}\text{Cr}_{1.19}\text{Al}_{0.62}\text{Fe}^{3+}_{0.16}\text{Ti}_{0.01}\text{O}_4$. Относительно стабильно по профилю содержание других оксидов (мас. %): Cr_2O_3 — 42.3—43.4, Al_2O_3 — 14.8—15.8, Fe_2O_3 — 4.1—6.0 и MnO — 2.3—2.8.

Замещение шпинелида магнетитом сопровождалось мобилизацией хрома, который частично фиксировался в замещающем минерале. Содержание Cr_2O_3 в магнетите составляет 3.5 и 5.9 мас. % в непосредственной близости от хромшпинелида, уменьшаясь по мере удаления от контакта.

На рис. 8 картина замещения хромшпинелида магнетитом усложнена наличием гематита, который, замещая магнетит, развивался преимущественно вдоль границы с хромшпинелидом. Первоначальные контуры хромшпинелида примерно соответствуют внешнему краю гематитового кольца. Это видно по характеру распределения мелких включений хромшпинелида в гематите; замещено 15—20 % первоначального объема хромшпинелида.

Распределение ZnO в хромшпинелиде имеет не V-, а W-образный профиль, обусловленный глубоким проникновением гематита (по магнетиту) в замещаемое зерно хромшпинелида. Максимальные содержания ZnO (до 11.7 мас. %) отмечены на контакте с гематитом, минимальные (1.3 мас. %) — в центральной части зерна. Здесь же отмечено наличие MgO (1.1—1.8 мас. %), свидетельствующее, что первоначально хромшпинелид был Mg-содержащим. Для центральной, наименее измененной части, характерно более высокое содержание FeO и, напротив, весьма низкое Fe_2O_3 (1.3—1.7 мас. %). В целом вариации FeO составляют 20.7—28.3 мас. %. Более стабильно содержание других элементов (мас. %): Cr_2O_3 — 48.5—52.1, Al_2O_3 — 11.2—13.0 и MnO — 2.4—2.7 (табл. 6). Количество Zn связано обратной зависимостью с содержанием ($\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}$): формула наиболее бедного цинком шпинелида — $\text{Fe}^{2+}_{0.82}\text{Zn}_{0.03}\text{Mn}_{0.08}\text{Mg}_{0.07}\text{Cr}_{1.41}\text{Al}_{0.52}\text{Fe}^{3+}_{0.06}\text{V}_{0.01}\text{O}_4$ (точка 33), наиболее богатого цинком — $\text{Fe}^{2+}_{0.61}\text{Zn}_{0.31}\text{Mn}_{0.08}\text{Cr}_{1.40}\text{Al}_{0.48}\text{Fe}^{3+}_{0.11}\text{V}_{0.01}\text{O}_4$ (точка 42).

Содержание Cr_2O_3 в магнетите составляет 5.4 и 5.8 мас. % в непосредственной близости от хромшпинелида, уменьшаясь по мере удаления от контакта. Магнетит включает удлиненные частицы мусковита, содержащего около 1 мас. % Cr_2O_3 .

Замещение *глиноземистых хромшпинелидов* магнетитом происходит весьма своеобразно. Специфика такого замещения заключается в широком развитии каём и прожилков феррихромит-хроммагнетитового состава, причем повышение содержания Zn в замещаемом шпинелиде определенно контролируется фронтом замещения.

В центральной части относительно крупного (0.5 мм) кристалла магнетита присутствует зерно хромшпинелида. Содержание Cr_2O_3 в магнетите составляет 0.9—1.1 мас. % вблизи хромшпинелида, уменьшаясь до 0.4—0.5 на расстоянии 20—30 мкм, далее 50 мкм Cr в магнетите не фиксируется. В магнетите по трещинкам в небольшом количестве развивается гематит (рис. 9). Каймы и прожилки феррихромит-хроммагнетитового состава развиваются в хромшпинелиде со стороны как магнетита, так и включений хлоритфукситового состава, прожилки пронизывают зерно хромшпинелида. Минимальное содержание ZnO в хромшпинелиде 4.3 мас. %, высокие содержания ZnO (12.2—14.2 мас. %) отмечаются на участках, окаймляющих прожилки железистых шпинелидов, наиболее высокие содержания ZnO (до 16.5 мас. %) отмечены в мелких реликтах (рис. 9, b). Цинк замещает двухвалентное железо, при этом в хромшпинелиде заметно возрастает содержание трехвалентного железа, изменения в содержании прочих компонентов невелики (табл. 7).

Прожилки имеют зональное строение, центральная часть сложена Cr-содержащим мусковитом (присутствует не всегда) и хроммагнетитом; внешняя, примыкающая к хромшпинелиду, — феррихромитом. Феррихромит резко отличается по составу от замещаемого хромшпинелида, в нем очень мало глинозема и, напротив, много Fe_2O_3 , содержание ZnO 2.8—3.9 мас. %, что существенно меньше, чем в прилегающих участках хромшпинелида. В хроммагнетите значительно уменьшается содержание Cr_2O_3 и еще более увеличивается содержание Fe_2O_3 (табл. 7).

При более полном замещении глиноземистого хромшпинелида феррихромитом и магнетитом от него остаются только мельчайшие реликты (рис. 10). Остатки хромшпинелида характеризуются стабильным составом и весьма высокими содержаниями Zn (мас. %): ZnO — 17.0—17.5, Al_2O_3 — 24.1—25.1, Cr_2O_3 — 30.6—31.6, Fe_2O_3 — 5.5—6.6, FeO — 18.1—18.9, MnO — 1.9—2.0, TiO_2 — 0.4—0.6. Формула наиболее богатого Zn минерала — $\text{Fe}^{2+}_{0.52}\text{Zn}_{0.44}\text{Mn}_{0.05}\text{Cr}_{0.82}\text{Al}_{1.01}\text{Fe}^{3+}_{0.14}\text{Ti}_{0.02}\text{O}_4$. В феррихромите, замещающем хромшпинелид, содержания Zn

существенно ниже, резко уменьшается содержание Al, возрастает содержание двухвалентного и особенно трехвалентного Fe (мас. %): ZnO — 3.7—4.9, Al₂O₃ — 1.5—2.3, Cr₂O₃ — 25.6—28.4, Fe₂O₃ — 36.2—39.8, FeO — 24.0—25.2, MnO — 2.7—2.9. Формула наиболее богатого Cr минерала — Fe²⁺_{0.79}Zn_{0.12}Mn_{0.09}Cr_{0.85}Al_{0.11}Fe³⁺_{1.04}O₄.

В магнетитовых прожилках, заключенных в феррихромите, содержание Cr₂O₃ составляет 3.1—3.8 мас. %, другие компоненты (Al₂O₃, ZnO и MnO), присущие замещаемому хромшпинелиду, не обнаружены. В зерне магнетита, окружающем зерно хромшпинелида, содержание Cr₂O₃ составляет 0.9 мас. %.

Обсуждение результатов

Состав всех зерен хромшпинелидов в терригенных породах алькесвожской свиты является вторичным, в них практически нет магния, характерного элемента, присущего первичным магматогенным хромшпинелидам. Остаточные содержания MgO (до 1.8 мас. %) сохранились только в центральных частях некоторых зерен. Соотношения трехвалентных катионов более устойчивы к внешним воздействиям и отражают в какой-то степени первоначальный состав хромшпинелида. Это заключение основано на литературных данных (например, Staddon et al., 2021) и подтверждается нашими наблюдениями. К примеру, в зернах хромшпинелидов с зональным строением при значительных изменениях в составе двухвалентных катионов соотношения между трехвалентными катионами практически не изменяются (зерна 206116_2 и 520602_1, состав на рис. 11, а обозначен кольцами). Состав детритовых хромшпинелидов во время формирования отложений алькесвожской свиты, как об этом можно судить по составу центральных частей зерен (рис. 11, а), был достаточно разнообразен, что связано с их поступлением из различных источников.

Взаимодействие хромшпинелидов с окружающими минералами при метаморфической перекристаллизации пород алькесвожской свиты проявляется повсеместно и заключается в замещении хромшпинелидов слюдой или магнетитом в зависимости от положения в разрезе. При замещении хромшпинелидов слюдой вокруг них образовались фукситовые оторочки с последующей фрагментацией зерен и, наконец, полным разложением. Мобилизованный хром фиксировался в фуксите, гематите, хлорите и новообразованном Zn-содержащем хромшпинелиде. В базальном горизонте алькесвожской свиты магнетит активно замещает зерна хромшпинелидов, в результате чего многие из них расчленены на отдельные фрагменты. В замещающем магнетите присутствует примесь Cr, некоторая его часть фиксировалась также в хлорите и мусковите. В замещаемом хромшпинелиде в

ряде случаев наблюдаются закономерные изменения состава. Постепенно активное замещение хромшпинелида магнетитом сменилось нарастанием внешних слоев магнетита, в которых Cr уже не обнаруживается. Магнетит, нарастающий на хромшпинелид и частично его замещающий, видимо, предохранял хромовый минерал от полного исчезновения.

Все детритовые хромшпинелиды, обнаруженные в породах алькесвожской свиты, имеют высокое содержание ZnO. Возникает закономерный вопрос о времени обогащения хромшпинелидов цинком: произошло ли оно в материнской ультраосновной породе или значительно позже — после денудации коренного источника, транспортировки зерен и преобразования кластогенных хромшпинелидов уже в осадочной породе.

В целом преобразования хромшпинелидов при метаморфизме гипербазитов и терригенных осадочных пород имеет сходный характер, что обусловлено общими причинами — неустойчивостью первично-магматических минералов в новых термодинамических условиях, в результате чего хромшпинелид взаимодействует с окружающей средой. Одним из следствий такого взаимодействия является обогащение хромшпинелидов цинком. Однако состав гипербазитов и терригенных пород значительно отличается, в первую очередь высокими содержаниями щелочей в терригенных породах. Поэтому замещение хромшпинелидов фукситом, широко распространенное в метатерригенных породах, в метагипербазитах реализуется в незначительных масштабах. Из количественных соотношений между шпинелеобразующими компонентами (Fe, Mg и Zn) и между Zn и Cr обогащение вторичных хромшпинелидов цинком в метатерригенных породах более вероятно, чем в метагипербазитах (Онищенко, 2025).

Между тем достоверно связать замещение хромшпинелида фукситом, наблюдаемое в породах алькесвожской свиты, с одновременным обогащением остаточного хромшпинелида цинком не представляется возможным. В хромшпинелидах с однородным распределением элементов, замещаемых магнетитом, установить время обогащения цинком также затруднительно.

Ключевое значение имеют некоторые зерна, заключенные в магнетите, в которых изменения состава выражены более отчетливо и в которых можно определить не только характер изменений, но и относительное время их проявления. Во всех хромшпинелидах с неоднородным распределением цинка его наиболее высокие концентрации приурочены к фронту замещения магнетитом, что свидетельствует о взаимосвязи процесса замещения и привноса цинка.

Миграция цинка из внешней среды в хромшпинелид хорошо прослеживается в зернах с ярко выраженным зональным распределением ZnO (рис. 7), миграция облегчается наличием трещин (рис. 8). Первоначальная форма зерен хромшпинелидов сохранилась плохо, тем не менее округлая форма зерна на рис. 7, видимо, свидетельствует о его окатывании при транспортировке. А распределение цинка повторяет внешние (т. е. окатанные) контуры зерен хромшпинелида. Другими словами, хромшпинелид обогатился цинком в осадочной породе.

Замещение магнетитом глиноземистых хромшпинелидов сопровождается широким развитием кайём и прожилков феррихромит-хроммагнетитового состава, причем повышение содержания Zn в хромшпинелиде контролируется фронтом замещения. Наличие калиевой слюды в феррихромит-хроммагнетитовых прожилках (рис. 9) свидетельствует о совместной миграции калия и цинка из алюмосиликатной части породы с фиксацией калия в слюде, а цинка — в прилегающей части хромшпинелида. Наряду с привнесением цинка из внешней среды есть признаки перераспределения этого элемента в процессе продвижения фронта замещения. Именно так можно объяснить исключительно высокие содержания цинка (до 17.5 мас. %) ZnO в реликтах хромшпинелида среди феррихромита (рис. 10).

Выше было показано, что обогащение хромшпинелида цинком связано в первую очередь с выносом двухвалентного железа и магния (рис. 7, с). Представляет интерес поведение трехвалентных элементов в этом процессе, который в наиболее полном виде проявлен в зернах глиноземистых хромшпинелидов. В химическом отношении замещение хромшпинелида феррихромитом и далее хроммагнетитом и магнетитом заключается в последовательной замене Al_2O_3 на Fe_2O_3 (рис. 11, а, длинная горизонтальная стрелка), а затем (после исчерпания Al_2O_3) замене Cr_2O_3 на Fe_2O_3 . Менее очевидно процесс замены Al_2O_3 на Fe_2O_3 проявлен в некоторых зернах хромшпинелидов в группе с относительно равномерным распределением элементов, характер химических процессов в таких зернах отражен верхней короткой горизонтальной стрелкой (рис. 11, а). В зернах с ярко выраженным зональным распределением ZnO и, соответственно, FeO (рис. 7) увеличение содержания Fe_2O_3 также проявлено (табл. 5), но невелико в количественном отношении и почти не отражается на диаграмме Al—Cr— Fe^{3+} (рис. 11, а), за исключением одной точки в зерне 520602_1, характеризующей состав хромшпинелида на контакте с магнетитом.

Изменение содержания ZnO в хромшпинелиде закономерно связано с увеличением доли Fe^{3+} в его составе, точнее со степенью окисленности железа, которая выражается значением $Fe^{3+}/\Sigma Fe$. При увеличении $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ доля Zn среди двухвалентных катионов возрастает, достигает максимума, а затем резко

снижается (рис. 11, b). Эволюция состава, показанная стрелками, полностью повторяет строение зерен хромшпинелидов от центра к периферии. Полный цикл замещений прослеживается только в зерне 206116_1 (рис. 9). В зернах глиноземистых хромшпинелидов уменьшение содержания Zn связано с появлением феррихромита. В не столь глиноземистых шпинелидах уменьшение содержания Zn на контакте с магнетитом также регистрируется, чаще всего во фрагментах хромшпинелида в магнетите, как, например, в зерне 205136_1 (рис. 5, b; рис. 11).

Хотя обогащение цинком детритовых хромшпинелидов при метаморфизме пород алькесвожской свиты удастся доказать только для некоторой их части, скорее всего, этот процесс затронул все зерна хромшпинелидов. В этой связи можно указать, что специфические хромофильные свойства цинка реализуются в осадочной породе в первую очередь путем замещения детритовых хромшпинелидов, но в некоторых случаях в матрице фуксита отмечено образование идиоморфных кристалликов Zn-содержащего (14.4—18.1 мас. % ZnO) хромшпинелида (рис. 4, c; табл. 5). Следует отметить, что в золотоносных фукситовых прожилках в риолитах (месторождение Чудное) в этих же условиях метаморфизма также происходил синтез мелких идиоморфных кристаллов цинкохромита (Онищенко, 2025).

Необходимо также остановиться на роли гематита в процессах преобразования хромшпинелидов в породах алькесвожской свиты. Метаморфогенный магнетит развивается по детритовым зернам хромшпинелида, используя их как затравку. С другой стороны, сам магнетит подвергается частичному замещению гематитом. Чаще всего гематит присутствует в магнетите в виде пластинок по трещинам отдельности, но в некоторых случаях он развивается по магнетиту на границе с хромшпинелидом, усложняя картину взаимоотношений между этими минералами (рис. 6 и 8). Между тем, если сравнить рис. 8, где вокруг хромшпинелида есть гематитовое кольцо, с рис. 7, где гематит отсутствует, становится очевидным, что образование гематита не повлияло заметным образом на распределение элементов в хромшпинелиде. В то же время изменение состава хромшпинелида 206116_3 (рис. 6), который пронизан прожилками гематита, отличается от направления эволюции состава в других зернах отчетливой заменой Cr_2O_3 на Fe_2O_3 (рис. 11, a), что, в принципе, можно объяснить окислительной обстановкой, связанной с образованием гематита. Впрочем, на диаграмме (рис. 11, b) изменение состава этого зерна, хотя и обладает индивидуальными особенностями, но вписывается в общий тренд. Таким образом, в целом замещение магнетита гематитом не привело к значительному изменению состава хромшпинелидов.

Метаморфизм пород сопровождается их перекристаллизацией с образованием бластовых структур и сланцеватых текстур. Химические элементы, входящие в состав минералов, получают возможность мигрировать и слагать новые минералы. К новообразованным минералам в породах алькесвожской свиты относятся пирофиллит и хлоритоид, приуроченные к прослоям, обогащенным глиноземом. К числу новообразований относятся также Zn-содержащие хромшпинелиды — как замещающие первичные детритовые хромшпинелиды, так и синтезированные в Cr-содержащем субстрате. Цинк, необходимый для этого, поступает в поровый раствор при перекристаллизации, скорее всего, глинистых минералов. Помимо хромшпинелидов, значительным трансформациям подвергся еще один детритовый минерал, а именно ильменит, представленный главным образом апоильменитовым лейкоксеном, перекристаллизация которого приводит к образованию скоплений зерен рутила и гематита.

Заключение

Преобразования детритовых хромшпинелидов при метаморфизме нижнепалеозойских пород алькесвожской свиты на Приполярном Урале в зависимости от положения их в разрезе происходили по двум сценариям. В первом из них хромшпинелиды замещались Cr-содержащим мусковитом (фукситом), во втором — магнетитом.

При замещении хромшпинелидов слюдой вокруг них образовались фукситовые оторочки с последующей фрагментацией зерен и, наконец, полным разложением. Мобилизованный хром фиксировался в метаморфогенных фуксите, гематите, хлорите, иногда в новообразованном Zn-содержащем хромшпинелиде. В некоторых случаях пути миграции Cr совпадали с направлениями перемещения золотоносных растворов, что приводило к образованию сростаний самородного золота с Cr-содержащими минералами.

Метаморфогенный магнетит развивается по детритовым зернам хромшпинелида, используя их как затравку. В замещающем магнетите присутствует примесь хрома, некоторая часть хрома фиксировалась также в хлорите и мусковите. Активное замещение хромшпинелида магнетитом сменилось нарастанием внешних слоев магнетита, в которых Cr уже не обнаруживается, происходила консервация реликтов хромшпинелидов в магнетите.

Состав всех зерен хромшпинелидов является вторичным, в них практически нет магния, характерного элемента, присущего первичным магматогенным

хромшпинелидам. Остаточные содержания MgO (до 1.8 мас. %) сохранились только в центральных частях некоторых зерен.

Все реликты хромшпинелидов в породах алькесвожской свиты характеризуются специфическим составом — они являются Zn-содержащими. Концентрация ZnO в зернах с относительно однородным распределением компонентов заключена в интервалах от 3.4—8.8 до 9.8—12.4 мас. %, диапазон содержаний ZnO в зернах зонального строения и зернах глиноземистого состава значительно больше (1.3—11.7 мас. % и 4.3—16.5 мас. %). Максимальное отмеченное нами содержание ZnO составляет 17.5 мас. %, а, учитывая литературные данные (Макеев и др., 1999), содержание ZnO в детритовых хромшпинелидах алькесвожской свиты достигает 27.4 мас. %.

Вполне вероятно, что обогащение всех зерен хромшпинелидов цинком произошло непосредственно при метаморфизме пород алькесвожской свиты, но доказать это оказалось возможным только для зерен с неоднородным распределением цинка. В хромшпинелидах наиболее высокие концентрации цинка контролируются фронтом замещения метаморфогенным магнетитом, что свидетельствует о взаимосвязи процесса замещения и привноса цинка. В наглядной форме это проявляется при замещении магнетитом глиноземистых хромшпинелидов, которое сопровождается широким развитием прожилков слюдисто-феррихромит-хроммагнетитового состава. Наличие калиевой слюды в этих прожилках свидетельствует о совместной миграции калия и цинка из алюмосиликатной части породы с фиксацией калия в слюде, а цинка — в прилегающей части хромшпинелида. Наряду с привносом цинка из внешней среды есть признаки перераспределения этого элемента в процессе продвижения фронта замещения, что приводит к весьма значительному повышению содержания цинка в реликтах хромшпинелида среди феррихромита.

В целом можно констатировать, что детритовые хромшпинелиды в породах алькесвожской свиты подверглись глубоким преобразованиям и замещению вплоть до полного исчезновения. Характерной геохимической меткой преобразованных хромшпинелидов является значительное содержание цинка, которое обусловлено перераспределением элементов при метаморфизме осадочной породы. Об исключительной способности цинка концентрироваться в шпинелидах свидетельствует не только замещение детритовых хромшпинелидов Zn-содержащими разновидностями, но и локально проявленные явления синтеза Zn-содержащих хромшпинелидов в Cr-содержащем субстрате (фуксите).

Таким образом, наиболее вероятно, что обогащение всех зерен детритовых хромшпинелидов цинком произошло непосредственно в породах алькесвожской

свиты при метаморфизме в условиях зеленосланцевой фации. Вместе с тем нельзя исключать вероятность того, что некоторая часть зерен была предварительно обогащена цинком еще при трансформации хромшпинелидов в материнской ультраосновной породе.

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