



COMPOSITION OF SPINEL GROUP MINERALS FROM LATE PROTEROZOIC ULTRAMAFIC LAMPROPHYRES OF THE BOLSHETAGNINSKII ALKALINE ULTRAMAFIC CARBONATITE COMPLEX LOCATED AT THE URIK-IYA GRABEN, EASTERN SAYAN REGION

Ya.N. Nugumanova ¹✉, A.G. Doroshkevich ^{1,2}

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

ABSTRACT: This paper provides the results on spinel sampled from ailikites of the Bolshetagninskii massif of the East Sayan region. The study aimed to determine the history of formation of ultramafic lamprophyres of the Ziminsky complex. Spinel from three dikes of the Bolshetagninskii massif with different mineral compositions of the groundmass but similar textural and structural features (BTG 2/21, TKG 3, BTG 6/21) was analyzed. The content of the main elements and microcomponents in spinel was determined using electron microscope and microprobe. All spinel crystals are zonal, the following types have been identified with regard to the composition: chromites (Chr), aluminum-chromites (Al-Chr), chromium magnetites (Cr-Mgt), titanomagnetites (Ti-Mgt) and magnetites (Mgt). The composition of spinel from sample BTG 2/21 of ultramafic lamprophyres of the Bolshetagninskii massif shows the following trend: chromite→ aluminum-chromite→ chromium magnetite→ titanomagnetite→ magnetite. Sample TKG 3 contains spinel with compositional change from chromite→ chromium magnetite. Chromite cores from sample BTG 6/21 are overgrown with chromium magnetite, as well as titanomagnetite.

We assume the primary melt, from which the primary chromite crystallized, to be the same for all samples studied. After chromite formed from the same melt and possibly in the same chamber, each melt portion experiences its own history of formation as evidenced by spinel study.

KEYWORDS: spinel; kimberlite-like rocks; zonal crystals; ailikite; Ziminsky complex

FUNDING: Petrographic studies were supported by research projects of IGM SB RAS (FWZN-2022-2025) and GIN SB RAS (AAAA-A21-121011390002-2), the study of spinel composition was supported by RSF project 19-17-10004.

SHORT COMMUNICATION

Received: August 5, 2022

Revised: September 5, 2022

Correspondence: Yazgul N. Nugumanova, nugumanovayn@igm.nsc.ru

Accepted: September 12, 2022

FOR CITATION: Nugumanova Ya.N., Doroshkevich A.G., 2022. Composition of Spinel Group Minerals from Late Proterozoic Ultramafic Lamprophyres of the Bolshetagninskii Alkaline Ultramafic Carbonatite Complex Located at the Urik-Iya Graben, Eastern Sayan Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0656. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0656

СОСТАВ ШПИНЕЛИДОВ ИЗ ПОЗДНЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ЛАМПРОФИРОВ БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНОГО КАРБОНАТИТОВОГО МАССИВА (УРИКСКО-ИЙСКИЙ ГРАБЕН, ВОСТОЧНОЕ ПРИСАЯНЬЕ)

Я.Н. Нугуманова¹, А.Г. Дорошкевич^{1,2}

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

АННОТАЦИЯ. В данной работе приводятся результаты изучения шпинелидов из айликов Большетагнинского массива Урикско-Ийского грабена, Восточное Присянье. Целью исследований было определение эволюции состава айликового расплава и идентификация изученных лампрофиров Большетагнинского массива. Изучены шпинелиды из трех даек Большетагнинского массива, имеющих разный минеральный состав основной массы, но схожие текстурно-структурные особенности (BTG 2/21, TKG 3, BTG 6/21). С помощью электронного микроскопа и микрозонда определено содержание основных элементов и микрокомпонентов в шпинелидах. Все кристаллы шпинелидов зональные, и по составу авторами были выделены следующие типы: хромиты (Chr), алюмохромиты (Al-Chr), хромистые магнетиты (Cr-Mgt), титаномангнетиты (Ti-Mgt), магнетиты (Mgt). Состав шпинелидов из образца BTG 2/21 ультраосновных лампрофиров Большетагнинского массива показывает следующий тренд изменения: хромит → алюмохромит → хромистый магнетит → титаномангнетит → магнетит. Образец TKG 3 содержит шпинелиды с изменением состава от хромитов к хромистым магнетитам. Хромитовые ядра из образца BTG 6/21 обрастают хромистыми магнетитами, затем титаномангнетитами.

Предполагается, что первичный расплав, из которого кристаллизовались первичные хромиты, для всех изученных образцов был один и тот же. После формирования хромитов из единого расплава (возможно в единой камере) каждая порция расплава переживает свою историю становления, что подтверждается исследованиями шпинелидов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: шпинелиды; кимберлитоподобные породы; зональные кристаллы; айлики; зиминский комплекс

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Петрографические исследования проводились за счет средств проектов НИР ИГМ СО РАН (FWZN-2022-2025) и ГИН СО РАН (AAAA-A21-121011390002-2), состав шпинелидов изучался за счет средств проекта РНФ 19-17-10004.

1. ВВЕДЕНИЕ

Кимберлиты и ультраосновные лампрофиров несут важную информацию о процессах, происходящих в верхней мантии, а также о составе мантийных пород, которые были источником материала для их родоначальной магмы, а происхождение и классификация кимберлитоподобных пород остаются предметом дискуссий [Chalapathi Rao et al., 2004; Tappe et al., 2004, 2008]. Шпинелиды являются типичными ранними оксидами кимберлитов и ультраосновных лампрофиров. Кристаллы шпинелидов в кимберлитоподобных породах встречаются в основной массе в виде мелких октаэдров. Р. Митчелл [Mitchell, 1986, 1995] и П. Редер [Roeder, Schulze, 2008] выделяют две основные генетические популяции шпинелидов в кимберлитах: ксенокристаллы, образованные при разрушении мантийных ксенолитов, и зерна шпинелидов, закристаллизованные непосредственно из кимберлитового расплава. Минералы группы шпинели являются устойчивыми фазами и могут служить индикаторами процесса кристаллизации и эволюции состава расплава кимберлитов и родственных пород, поэтому с целью определения эволюции состава айликового расплава и идентификации

изученных лампрофиров Большетагнинского массива мы изучили шпинелиды в них.

Большетагнинский массив относится к Восточному Присянью, в пределах которого широко развит кимберлитовый магматизм. В данном регионе выделяют несколько этапов внедрения лампроитов и кимберлитов: мезопротерозой (средний рифей, ~1200 млн лет), неопротерозой (венд, ~630 млн лет) и средний палеозой (девон, ~370 млн лет) [Egorov et al., 2010]. Вопрос об их возрасте, классификации и генетической связи остается открытым, поэтому для исследований был выбран именно этот объект.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕТРОГРАФИЯ

Урикско-Ийский грабен находится на юго-западной окраине Сибирской платформы. Грабен представляет собой палеоавлакоген и сложен вулканогенно-осадочными отложениями раннего протерозоя и раннего рифея [Gladkochub et al., 2014].

Урикско-Ийский грабен включает в себя Белозиминский, Среднезиминский, Большетагнинский щелочно-ультраосновные карбонатитовые массивы. Массивы щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов

объединены в зиминский комплекс. Выделяют четыре фазы магматических пород зиминского комплекса. Первая фаза представлена пироксенитами и породами уртит-ийолит-мельтейгитового ряда, вторая фаза – нефелиновыми и щелочными сиенитами, третья фаза сложена кальцитовыми и анкеритовыми карбонатитами. Начало образования кимберлитоподобных пород зиминского комплекса приходится на докарбонатитовый этап, часть из них являются интракарбонатитовыми. Кимберлитоподобные породы выполняют дайки и трубки взрыва и представлены в основном щелочными пикритами, слюдястыми кимберлитами и айликистами [Bagdasarov, 2001; Frolov et al., 2005; State Geological Map..., 2019; Savel'eva et al., 2020].

Большектагнинский массив залегает в осадочно-метаморфических отложениях урикской и ингашинской свит нижнепротерозойского возраста, сложенных кварцевыми и полимиктовыми песчаниками, углистглинистыми и серицит-хлоритовыми сланцами. Массив имеет округлую форму и сложен различными породами (от древних к молодым): пироксенитами, ийолитами, нефелиновыми и щелочными сиенитами, щелочными метасоматитами, карбонатитами. В пределах массива широко распространены докарбонатитовые и посткарбонатитовые пикритовые порфиристы, слюдяные пикритовые порфиристы и кимберлитоподобные породы. Возраст массива оценивается как вендский (около 645 млн лет).

Образцы для изучения были отобраны из посткарбонатитовых даек кимберлитоподобных пород Большектагнинского массива. Дайки, мощностью от 5 до 20 м, имеют четкие резкие секущие контакты с породами ранних фаз. В данной работе изучены шпинелиды из трех образцов, имеющих разный минеральный состав основной массы, но схожие текстурно-структурные особенности (BTG 2/21, TKG 3, BTG 6/21). Изученные образцы обладают порфировидной структурой, массивной текстурой и состоят из макрокристаллов оливина, почти полностью замещенного серпентином и/или тальком, погруженными в полностью раскристаллизованную основную массу, модальный состав которой и структурные особенности для каждого образца представлены в Приложении 1 (Прил. 1, табл. 1.1; рис. 1.1). По классификации [Tappe et al., 2005] все вышеописанные породы можно отнести к ультраосновным лампрофирам – айликистам.

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследования выполнены в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск, Россия).

Полированные образцы горных пород были использованы для определения содержания основных элементов минералов группы шпинели с помощью энергодисперсионной спектроскопии в сочетании с визуализацией в отраженных электронах (BSE) с использованием растрового электронного микроскопа TESCAN MIRA 3

LMU JSM-6510LV с префиксом энергии от X-Max Oxford Instruments для микрозондового анализа.

Микрокомпонентный состав шпинелидов определяли с помощью электронного микрозонда JEOL JXA-8230. Анализ проводился на спектрометрах с волновой дисперсией. Для анализа минералов группы шпинели использовали ток пучка 50 нА и ускоряющее напряжение 20 кВ. Время счета пиков составляло 10 с, счет фона – 5 с. Диаметр пучка непосредственно над поверхностью образца составлял 1 мкм. Для калибровки в качестве стандартов использовались как природные минералы, так и синтетические фазы.

В зональных шпинелях зоны были выделены с помощью контраста при визуализации BSE изображений, элементных рентгеновских изображений и линейных профилей.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Шпинелиды равномерно рассеяны в основной массе всех изученных пород. Также они часто наблюдаются в виде включений в оливинах. Обычно встречаются идиоморфные, субидиоморфные кристаллы. Все кристаллы шпинелидов зональные, и по составу нами были выделены следующие типы: хромиты (Chr), алюмохромиты (Al-Chr), хромистые магнетиты (Cr-Mgt), титаномагнетиты (Ti-Mgt), магнетиты (Mgt) (рис. 1).

Размер зерен шпинелидов из образца BTG 2/21 варьируется в пределах 50–100 мкм. Ядра кристаллов в основном представлены хромитом с содержанием Cr_2O_3 (40.09–45.24 мас. %), Al_2O_3 (12.68–16.05 мас. %), TiO_2 (2.87–3.81 мас. %), MgO (13.02–13.76 мас. %) (рис. 1, а–в; Прил. 1, табл. 1.2). Хромитовые ядра обрастают Al-хромитами с содержанием Cr_2O_3 (38.56–29.60 мас. %), Al_2O_3 (20.96–16.22 мас. %), TiO_2 (3.08–5.34 мас. %), MgO (14.00–15.14 мас. %) (рис. 1, а, б).

Al-хромиты окружены Cr-магнетитами, где содержание хрома варьируется в пределах Cr_2O_3 (18.94–6.68 мас. %), Al_2O_3 (14.81–11.40 мас. %), TiO_2 (8.99–5.50 мас. %), MgO (6.69–1.49 мас. %). Cr-магнетиты характеризуются относительно высоким содержанием Mn (5.93–10.15 мас. %) (рис. 1, б, в).

Состав Cr-магнетитов постепенно переходит в Ti-магнетитовый с содержанием Cr_2O_3 (5.82–2.05 мас. %), Al_2O_3 (11.79–8.65 мас. %), TiO_2 (7.90–10.38 мас. %), MgO (3.01–1.58 мас. %) (рис. 1, в).

Магнетиты обычно окружают хромистые магнетиты, либо титаномагнетиты, а также встречаются в виде субидиоморфных зерен с содержанием Cr_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , MgO ниже 1 мас. % (рис. 1, а–в).

Шпинелиды основной массы TKG 3 имеют более крупные кристаллы, размером 80–150 мкм. Включения хромитов в оливинах представлены более мелкими зернами, размером 10–30 мкм. Ядра кристаллов шпинелидов основной массы по составу соответствуют хромитам, края представлены трещиноватыми, губчатыми хромистыми магнетитами. Ядра кристаллов шпинелидов в основном сложены хромитом с содержанием Cr_2O_3 (46.89–40.11 мас. %), Al_2O_3 (10.77–12.11 мас. %),

TiO_2 (3.4–4.6 мас. %), MgO (12.02–13.74 мас. %) (рис. 1, г; Прил. 1, табл. 1.2). Хромитовые ядра обрастают хромистыми магнетитами с содержанием Cr_2O_3 (27.72–21.35 мас. %), Al_2O_3 (9.45–10.16 мас. %), TiO_2 (6.14–10.25 мас. %), MgO (0.34–0.00 мас. %) (рис. 1, г).

Шпинелиды из образца BTG 6/21 имеют зональные кристаллы размером 20–70 мкм. Хромитовые ядра окружены хромистыми магнетитами, затем титаномagnetитами. Ядро кристаллов шпинелидов представлено хромитом с содержанием Cr_2O_3 (35.08–45.61 мас. %), Al_2O_3 (11.58–16.4 мас. %), TiO_2 (2.2–4.1 мас. %), MgO (12.25–14.37 мас. %) (рис. 1, д; Прил. 1, табл. 1.2).

Состав хромитов меняется на Cr-магнетитовый, в котором содержание компонентов варьируется: Cr_2O_3 – 9.76–24.37 мас. %, Al_2O_3 – 9.40–21.35 мас. %, TiO_2 – 4.45–7.00 мас. %, MgO – 1.00–14.39 мас. %.

Cr-магнетиты обрастают Ti-магнетитами с содержанием Cr_2O_3 (0.22–9.76 мас. %), Al_2O_3 (6.54–9.40 мас. %), TiO_2 (10.22–14.19 мас. %), MgO (1.06–2.65 мас. %).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Шпинелиды из айликов Большетагнинского массива характеризуются зональными кристаллами, что предполагает кристаллизацию этих зерен при быстро

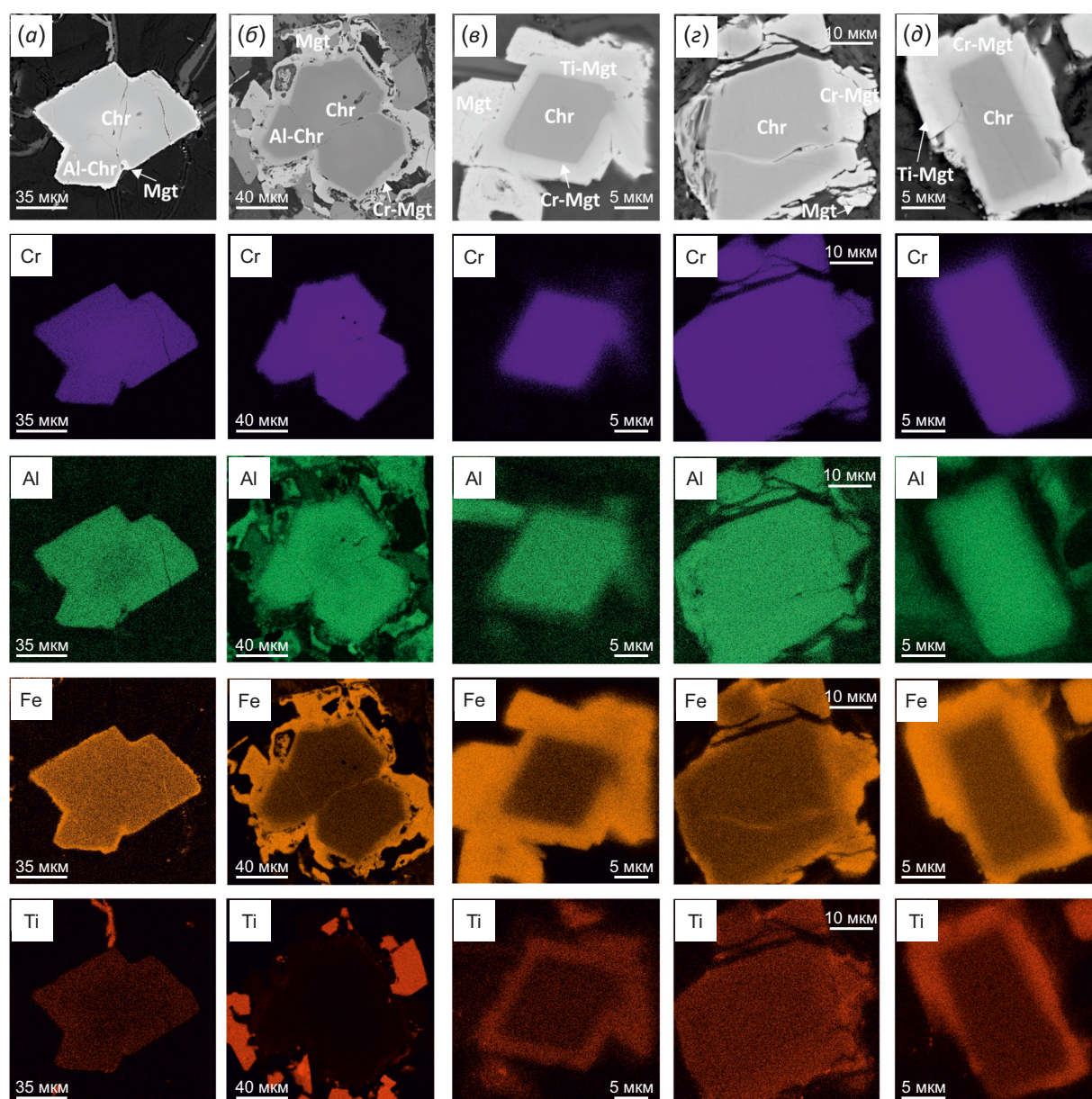


Рис. 1. BSE-изображения и элементные карты для шпинелидов из ультраосновных лампрофиров Большетагнинского массива. (а, б, е) – зерна шпинелидов из образца BTG 2/21; (з) – шпинелиды из TKG 3; (д) – шпинелиды из BTG 6/21. Chr – хромит, Al-Chr – алюмохромит, Cr-Mgt – хромистый магнетит, Ti-Mgt – титаномagnetит, Mgt – магнетит.

Fig. 1. BSE images and elemental maps for spinel from ultramafic lamprophyres of the Bolshetagninskii massif. (a, b, e) – spinel grains from sample BTG 2/21; (z) – spinel from TKG 3; (d) – spinel from BTG 6/21. Chr – chromite, Al-Chr – aluminum-chromite, Cr-Mgt – chromium magnetite, Ti-Mgt – titanomagnetite, Mgt – magnetite.

меняющихся физико-химических условиях с незначительной гомогенизацией [Roeder, Schulze, 2008; Nugumanova et al., 2021]. Самыми ранними шпинелидами изученных образцов являются высокохромистые хромиты, закристаллизованные непосредственно из ранней порции расплава. Затем состав хромитов из BTG 2/21, TKG 3, BTG 6/21 меняется по-разному.

В образце BTG 2/21 после хромитов кристаллизуется высокоглиноземистый хромит и полученные значения составов ложатся на глиноземистый тренд 3 (рис. 2, а). П. Редер и Д. Шульце [Roeder, Schulze, 2008] считают, что тренд 3 параллелен кривым изопотенциала оливина и шпинели Ирвина [Irvine, 1965] и является результатом быстрых температурных изменений и

совместной кристаллизации оливина и хромитов, контролируемой диффузией. Наши петрографические исследования подтверждают такую возможность. Дальнейшая кристаллизация зерен шпинелидов из BTG 2/21 связана с резким уменьшением Cr и неизменным Al в расплаве, что может быть объяснено отсутствием сокристаллизации Al-содержащих фаз (например, флогопита) и продолжением кристаллизации оливина, шпинели. В хромистых магнетитах BTG 2/21 наблюдается резкое увеличение содержания Mn, наиболее вероятно связанное с увеличением содержания этого компонента в эволюционировавшем расплаве либо с увеличением фугитивности кислорода. Ti-магнетиты BTG 2/21 характеризуются относительно невысоким содержанием

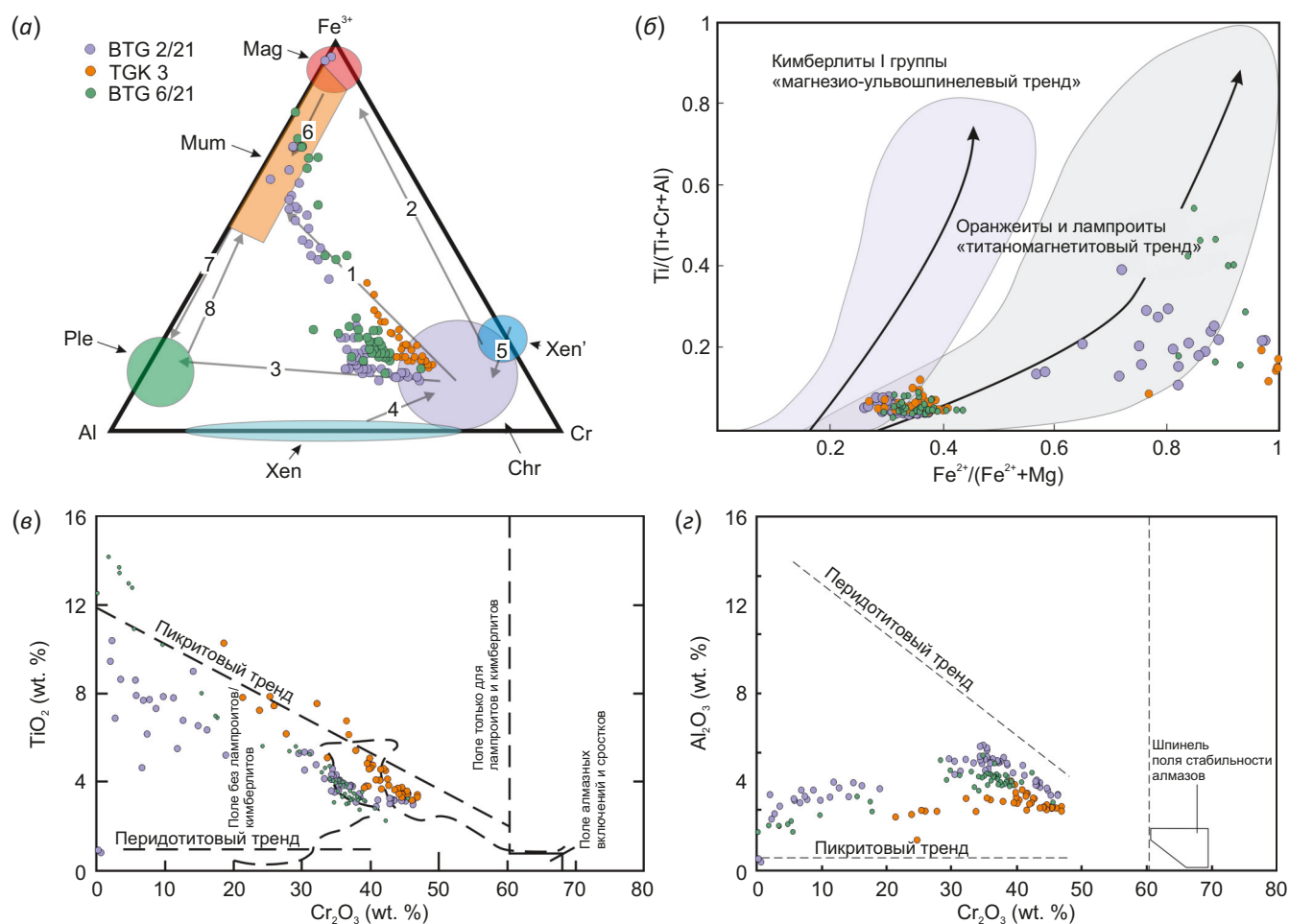


Рис. 2. Классификационные диаграммы составов для шпинелидов из ультраосновных лампрофиров Большетагнинского массива.

(а) – диаграмма $Al - Fe^{3+} - Cr$ [Roeder, Schulze, 2008]; (б) – изменение составов шпинелей из кимберлитов, оранжееитов и лампроитов [Mitchell, 1995]; (в, г) – отношения $TiO_2 - Cr_2O_3$; $Al_2O_3 - Cr_2O_3$ [Sobolev, 1974; Chalapathi Rao et al., 2012]. Xen – ксенокристаллы шпинели из перидотитов, Xen' – метасоматизированный ксенокристалл шпинели из перидотитов, Chr – хромит, Ple – плеонаст-шпинель, Mum – магнезио-ульвошпинель-магнетит и Mag – магнетит. Линиями показаны возможные тренды эволюции для различных генетических типов шпинелей.

Fig. 2. Classification diagrams of compositions for spinel from ultramafic lamprophyres of the Bolshetagninskii massif.

(а) – $Al - Fe^{3+} - Cr$ for spinel in kimberlites [Roeder, Schulze, 2008]; (б) – Compositional trends of spinels from kimberlites, orangeites and lamproites [Mitchell, 1995]; (в, г) – Cr_2O_3 (wt. %) vs TiO_2 (wt. %) and Cr_2O_3 (wt. %) vs Al_2O_3 (wt. %) plots [Sobolev, 1974; Chalapathi Rao et al., 2012]. Xen – spinel xenocrystals from peridotites, Xen' – metasomatized spinel xenocrystal from peridotites, Chr – chromite, Ple – pleonast-spinel, Mum – magnesian-ulvospinel-magnetite and Mag – magnetite. The lines show possible evolutionary trends for different genetic types of spinel.

Ti (до 10 мас. %), что объясняется их совместной кристаллизацией с перовскитом.

Состав хромитов TKG 3 меняется на высокохромистый магнетитовый с постепенным уменьшением содержания Cr, Al и исчезновением Mg. Такая эволюция составов является результатом совместной кристаллизации хромистых магнетитов и более раннего флогопита основной массы, кристаллизация которого подтверждается нашими петрографическими исследованиями. Также отличительной особенностью хромистых магнетитов TKG 3 являются их более крупные размеры по сравнению с хромистыми магнетитами других изученных образцов, где они представлены узкой зоной.

Кристаллизация хромитов BTG 6/21 приводит к постепенному уменьшению Cr в кристаллах шпинелидов, исчезновению Mg и формированию хромистых магнетитов и титаномagnetитов. Можно предположить, что такое изменение состава происходит за счет кристаллизации карбонатов и флогопита в основной массе.

Возможно, источник расплава для кристаллизации первичных хромитов из всех изученных образцов был один и тот же. Но после формирования хромитов каждая из порций расплава переживает свою историю становления, что подтверждается исследованиями шпинелидов.

Шпинелиды являются полезными индикаторными минералами, используемыми для типизации кимберлитоподобных пород. Р. Митчелл [Mitchell, 1995] показал, что значение $Cr/(Cr+Al) > 0.85$ является характерным для шпинелидов из оранжеитов, лампроитов и кимберлитов. Шпинелиды с $Cr/(Cr+Al) < 0.85$ характерны для базальтоидов, мелилитоидов и минетт. Для шпинелидов из образцов BTG 2/21, TKG 3, BTG 6/21 это отношение составляет 0.71, 0.76, 0.63 соответственно. На классификационной диаграмме [Mitchell, 1995] фигуративные точки составов изученных шпинелидов ложатся на тренд 2, характерный для шпинелидов из оранжеитов, лампроитов и ультраосновных лампрофиров (рис. 2, б).

На классификационной диаграмме [Roeder, Schulze, 2008] наблюдается изменение состава изученных шпинелидов от высокохромистых хромитов до магнезио-ульвошпинель-магнетитов по тренду 1, который является типичным для шпинелидов из кимберлитов 1-го типа, карбонатитов и ультраосновных лампрофиров (рис. 2, а). С другой стороны, классификационные диаграммы [Sobolev, 1974; Chalapathi Rao et al., 2012] показывают, что состав шпинелидов из ультраосновных лампрофиров зиминского комплекса меняется по тренду, схожему с пикритовым, и фигуративные точки составов не попадают в область составов шпинелидов из кимберлитов и родственных пород, так как имеют относительно низкое содержание Ti (рис. 2, в, г). Описанные выше классификационные диаграммы не всегда однозначны, что не позволяет только по составу шпинелидов классифицировать изученные породы.

Также мы сравнили составы изученных хромитов с составами хромитов из других айликитовых проявлений.

По сравнению с первичными хромитами из айликитовых даек Торнгат (Северный Лабрадор) [Tappe et al., 2004], изученные нами хромиты характеризуются более высокими содержаниями Al_2O_3 и низкими – TiO_2 . Однако полученные составы хорошо согласуются с составами шпинелидов из айлицитов Чадобецкого щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса и девонских ультраосновных лампрофиров Иркинеево-Чадобецкого прогиба Сибирской платформы [Nugumanova et al., 2021; Kargin et al., 2016]. Айлициты Чадобецкого комплекса характеризуются относительно высоким содержанием Al_2O_3 (~13 мас. %), и низким – TiO_2 (~5 мас. %). Такое различие составов первичных хромитов из айлицитов Торнгат и Сибирской платформы может быть обусловлено различным составом источника глубинной литосферной мантии.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, состав шпинелидов из образца BTG 2/21 ультраосновных лампрофиров Большетагнинского массива показывает следующий тренд изменения: хромит → алюмохромит → хромистый магнетит → титаномagnetит → магнетит. Образец TKG 3 содержит шпинелиды с изменением состава от хромитов к хромистым магнетитам. Хромитовые ядра из образца BTG 6/21 обрастают хромистыми магнетитами, затем титаномagnetитами. Исходный расплав, из которого кристаллизовались первичные хромиты, для всех изученных образцов был один и тот же. После формирования хромитов из единого расплава (возможно в единой камере) каждая порция расплава переживает свою историю становления, что подтверждается исследованиями шпинелидов.

Классификационные диаграммы для шпинелидов не всегда однозначны, что не позволяет только по составу шпинелидов классифицировать изученные породы. Состав шпинелидов из айлицитов Большетагнинского массива отличается от шпинелей других айлицитов мира, но имеет схожий состав с шпинелидами из айлицитов Сибирской платформы.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы выражают благодарность сотрудникам лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН Е.Н. Нигматуллиной и М.В. Хлезову за высокий профессионализм и помощь в проведении аналитических исследований. Также авторы благодарят И.Р. Прокопьева, М.Н. Крука, И.А. Избродина, Т.А. Радомскую за предоставление образцов пород из даек ультраосновных лампрофиров Большетагнинского массива для проведения исследований шпинелидов.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

9. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. The authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bagdasarov Yu.A., 2001. Metallogeny of Carbonatite Complexes of Russia. In: N.V. Mezhelovskiy (Ed.), Metallogeny of Magmatic Complexes of Within-Plate Geodynamic Settings. GEOS, Moscow, p. 128–506 (in Russian) [Багдасаров Ю.А. Металлогения карбонатитовых комплексов России // Металлогения магматических комплексов внутриплитовых геодинамических обстановок / Ред. Н.В. Межеловский. М.: ГЕОС, 2001. С. 128–506].

Bosi F., Biagioni C., Pasero M., 2019. Nomenclature and Classification of the Spinel Supergroup. *European Journal of Mineralogy* 31 (1), 183–192. <https://doi.org/10.1127/ejm/2019/0031-2788>.

Chalapathi Rao N.V., Gibson S.A., Pyle D., Dickin A.P., 2004. Petrogenesis of Proterozoic Lamproites and Kimberlites from the Cuddapah Basin and Dharwar Cratons, Southern India. *Journal of Petrology* 45, 907–948. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg116>.

Chalapathi Rao N.V., Lehmann B., Mainkar D., Panwar B.K., 2012. Diamond-Facies Chrome Spinel from the Tokapal Kimberlite, Indravati Basin, Central India and Its Petrological Significance. *Mineralogy and Petrology* 105, 121–133. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0199-5>.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., 2013. An Introduction to the Rock Forming Minerals. The Mineralogical Society, London, 498 p.

Egorov K.N., Kiselev A.I., Men'shagin Yu.V., Minaeva Yu.A., 2010. Lamproite and Kimberlite of the Sayany Area: Composition, Sources, and Diamond Potential. *Doklady Earth Sciences* 435, 1670–1675. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10120251>.

Frolov A.A., Lapin A.V., Tolstov A.V., Zinchuk N.N., Belov S.V., Burmistrov A.A., 2005. Carbonatites and Kimberlites (Interrelations, Metallogeny, Forecast). NIA-Priroda, Moscow, 540 p. (in Russian) [Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бурмистров А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогения, прогноз). М.: НИА-Природа, 2005. 540 с.].

Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Don-skaya T.V., Motova Z.L., Vanin V.A., 2014. Precambrian Sedimentation in the Urik-Iya Graben, Southern Siberian Craton: Main Stages and Tectonic Settings. *Geotectonics* 48 (5), 359–370. <https://doi.org/10.1134/S0016852114050033>.

Irvine T.N., 1965. Chromian Spinel as a Petrogenetic Indicator. Part I. Theory. *Canadian Journal of Earth Sciences* 2 (6), 648–672. <https://doi.org/10.1139/e65-046>.

Kargin A.V., Nosova A.A., Chugaev A.V., Sazonova L.V., Dokuchaev A.Y., Smirnova M.D., Postnikov A.V., Postnikova O.V.,

Popova L.P., Poshibaev V.V., 2016. Devonian Ultramafic Lamprophyre in the Irkineeva–Chadobets Trough in the Southwest of the Siberian Platform: Age, Composition, and Implications for Diamond Potential Prediction. *Geology of Ore Deposits* 58 (5), 383–403. <https://doi.org/10.1134/S1075701516050068>.

Mitchell R.H., 1986. Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology. Springer, New York, 442 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0568-0>.

Mitchell R.H., 1995. Kimberlites, Orangeites and Related Rocks. Springer, New York, 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1993-5>.

Nugumanova Ya., Doroshkevich A., Prokopyev I., Starikova A., 2021. Compositional Variations of Spinel from Ultramafic Lamprophyres of the Chadobets Complex (Siberian Craton, Russia). *Minerals* 11 (5), 456. <https://doi.org/10.3390/min11050456>.

Roeder P.L., Schulze D.J., 2008. Crystallization of Groundmass Spinel in Kimberlite. *Journal of Petrology* 49 (8), 1473–1495. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn034>.

Savel'eva V.B., Danilova Yu.V., Bazarova E.P., Danilov B.S., 2020. Kimberlite-Like Rocks of the Urik-Iya Graben, Eastern Sayan Region: Mineral Composition, Geochemistry and Formation Conditions. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (4), 678–696 (in Russian) [Савельева В.Б., Данилова Ю.В., Базарова Е.П., Данилов Б.С., 2020. Кимберлитоподобные породы Урикско-Ийского грабена, Восточное Присяянье: минеральный состав, геохимия и условия формирования // Геодинамика и тектонофизика. Т. 11. № 4. С. 678–696]. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0500>.

Sobolev N.V., 1974. Deep-Seated Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Composition of the Upper Mantle. Nauka, Novosibirsk, 264 p. (in Russian) [Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 264 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2019. East Sayan Series. Scale 1:200000. Sheet N-47-XXIII (Belaya Zima). Explanatory Note. Moscow Branch of VSEGEI, Moscow, 132 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Восточно-Саянская. Масштаб 1:200000. Лист N-47-XXIII (Белая Зима): Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2019. 132 с.].

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B.A., 2005. Integrating Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications. *Journal of Petrology* 46 (9), 1893–1900. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi039>.

Tappe S., Foley S.F., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Heaman L.M., Stracke A., Jenner G.A., 2008. Between Carbonatite and Lamproite-Diamondiferous Torngat Ultramafic Lamprophyres Formed by Carbonate-Fluxed Melting of Cratonic MARID-Type Metasomes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72 (13), 3258–3286. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.008>.

Tappe S., Jenner G.A., Foley S.F., Heaman L., Besserer D., Kjarsgaard B.A., Ryan B., 2004. Torngat Ultramafic Lamprophyres and Their Relation to the North Atlantic Alkaline Province. *Lithos* 76 (1–4), 491–518. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.040>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Модальный состав и структура основной массы изученных образцов (об. %)**Table 1.1.** Modal composition and structure of the groundmass of the samples studied (vol. %)

№ образца	BTG 2/21	BTG 6/21	TGK 3
Структура	мелкозернистая	тонкозернистая	среднезернистая
Шпинелиды	5	5	10
Флогопит	1	5	35
Перовскит	10	5	0
Апатит	10	5	5
Андрадит	30	0	0
Кальцит	1	5	0
Доломит	0	5	5
Сerpентин	40	25	0
Хлорит	5	10	5
Тальк	0	35	40

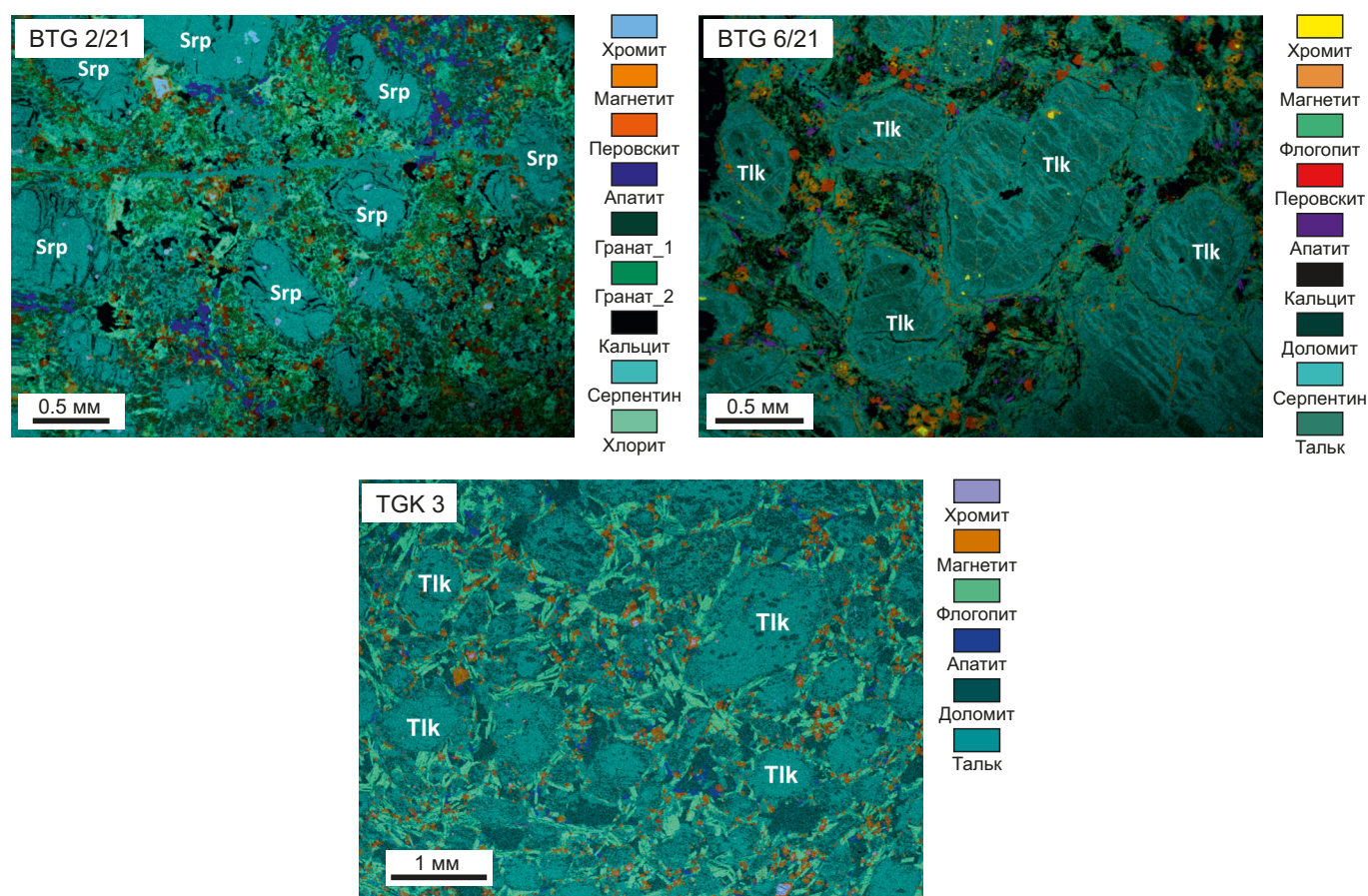
**Рис. 1.1.** Элементные карты для образцов BTG 2/21, BTG 6/21, TGK 3. Элементные рентгеновские изображения сделаны с помощью энергодисперсионной спектрометрии в сочетании с визуализацией в отраженных электронах (BSE) с использованием растрового электронного микроскопа.**Fig. 1.1.** Elemental maps for samples BTG 2/21, BTG 6/21 and TGK 3. Elemental x-ray images were taken with energy dispersive spectrometry coupled with reflected electron (BSE) imaging using scanning electron microscope.

Таблица 1.2. Химический состав хромитов (мас. %) из образцов BTG 2/21, TGK 3, BTG 6/21
Table 1.2. Chemical composition of chromite (wt. %) from samples BTG 2/21, TGK 3 and BTG 6/21

Обр. №	BTG_2_21					TGK 3					BTG_6_21				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Cr ₂ O ₃	46.35	46.33	45.25	44.79	44.66	46.9	46.89	46.09	45.49	45.49	46.35	46.33	45.25	44.79	44.66
Al ₂ O ₃	12.81	12.67	12.69	13.54	13.91	10.77	10.03	10.52	10.81	10.74	12.81	12.67	12.69	13.54	13.91
TiO ₂	3.16	2.97	3.13	3.22	3.15	3.4	3.29	3.16	3.47	3.43	3.16	2.97	3.13	3.22	3.15
FeO _{tot}	23.8	24.04	24.98	24.72	24.6	25.98	25.86	26.8	27.27	25.56	23.8	24.04	24.98	24.72	24.6
MgO	13.21	13.21	13.03	13.08	13.59	13.3	13.42	12.83	12.69	13.96	13.21	13.21	13.03	13.08	13.59
MnO	0.26	0.17	0.18	0.29	0.26	0.2	0.19	0.24	0.22	0.2	0.26	0.17	0.18	0.29	0.26
V ₂ O ₅	0.12	0.11	0.1	0.07	0.13	0.13	0.12	0.11	0.09	0.14	0.12	0.11	0.1	0.07	0.13
NiO	0.11	0.13	0.14	0.16	0.17	0.17	0.15	0.15	0.14	0.18	0.11	0.13	0.14	0.16	0.17
ZnO	0.08	0.05	0.07	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.11	0.06	0.08	0.05	0.07	0.09	0.09
Total	100.06	99.81	99.72	100.14	100.74	100.92	100.03	99.95	100.29	99.75	100.06	99.81	99.72	100.14	100.74
Формулы на основе 3 катионов и 4 атомов кислорода (формульные единицы)															
Cr	1.178	1.181	1.156	1.136	1.122	1.193	1.205	1.187	1.169	1.164	1.178	1.181	1.156	1.136	1.122
Al	0.485	0.482	0.483	0.512	0.521	0.409	0.384	0.404	0.414	0.41	0.485	0.482	0.483	0.512	0.521
Ti	0.076	0.072	0.076	0.078	0.075	0.082	0.08	0.077	0.085	0.084	0.076	0.072	0.076	0.078	0.075
Fe ³⁺	0.242	0.267	0.267	0.265	0.287	0.315	0.318	0.319	0.342	0.341	0.242	0.267	0.267	0.265	0.287
Fe ²⁺	0.371	0.352	0.378	0.368	0.335	0.349	0.349	0.376	0.361	0.313	0.371	0.352	0.378	0.368	0.335
Mg	0.633	0.635	0.627	0.625	0.644	0.638	0.65	0.623	0.615	0.673	0.633	0.635	0.627	0.625	0.644
Mn	0.007	0.005	0.005	0.008	0.007	0.005	0.005	0.007	0.006	0.005	0.007	0.005	0.005	0.008	0.007
V	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003
Ni	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004
Zn	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002

Примечание. Оксиды основных элементов (мас. %) были пересчитаны на формульные единицы (apfu) в соответствии с рекомендациями [Deer et al., 2013]. Fe²⁺ и Fe³⁺ рассчитаны согласно стехиометрии шпинели [Bosi et al., 2019].

Note. The oxides of main elements (wt. %) were converted to formula units (apfu) following the recommendations of [Deer et al., 2013]. Fe²⁺ and Fe³⁺ were calculated based on spinel stoichiometry [Bosi et al., 2019].