

*Locock A. J.* An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations // *Computers & Geosciences*. 2014. Vol. 62. P. 1–11.

*Spear F. S., Hazen R. M., Rumble D.* Wonesite: a new rock-forming silicate from the Post Pond volcanics, Vermont // *Am. Mineral*. 1981. Vol. 66. P. 100–105.

*Tsunogae T., Santosh M., Shimpo M.* Sodicgedrite in ultrahigh-temperature Mg-Al-rich rocks from the Palghat-Cauvery Shear Zone system, Southern India // *J. Mineral. Petrol. Sci.* 2007. Vol. 102. P. 39–43.

*Yavuz F.* WinAmphcal: A Windows program for the IMA-04 amphibole classification // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2007. Vol. 8, No. 1. P. 1–12.

#### **Сведения об авторах**

##### **Акимова Екатерина Юрьевна**

младший научный сотрудник, ИГГД РАН, 79052513147@yandex.ru

##### **Азимов Павел Яковлевич**

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ИГГД РАН, pavel.azimov@mail.ru

##### **Серебряков Николай Станиславович**

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ИГЕМ РАН, nikserebr@yandex.ru

##### **Akimova Ekaterina Yurievna**

Junior Researcher, IPGG RAS, 79052513147@yandex.ru

##### **Azimov Pavel Yakovlevich**

PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher, IPGG RAS, pavel.azimov@mail.ru

##### **Serebryakov Nikolay Stanislavovich**

PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher, IGEM RAS, nikserebr@yandex.ru

DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.002

УДК 552.321 + 549.5(470.22)

#### **Р. Л. Анисимов**

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

### **ХРОМШПИНЕЛИДЫ УЛЬТРАОСНОВНЫХ-ОСНОВНЫХ ИНТРУЗИЙ КИВАЧ И ПЕТУСЪЯРВИ (ЮГО-ЗАПАДНАЯ КАРЕЛИЯ)**

#### **Аннотация**

Приводятся результаты микрозондового изучения акцессорных хромшпинелидов ультрамафит-мафитовых массивов Кивач и Петусъярви. Данные массивы расположены к северо-востоку от Хаутоваарской зеленокаменной структуры, в пределах Карельского кратона Балтийского щита, и являются слабодифференцированными дайкообразными телами. Хромшпинелиды в целом представлены твердыми растворами хромита, магнетита и герцинита, вероятный тренд эволюции составов — уменьшение содержания Cr и Al и возрастание содержания Fe. Также приводится сопоставление хромшпинелидов Кивача и Петусъярви с составами хромшпинелидов некоторых других высоко-Mg пород Карелии.

#### **Ключевые слова:**

*Кивач, Петусъярви, ультрамафит-мафитовые интрузии, хромшпинелиды.*

**R. L. Anisimov**

Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint Petersburg, Russia

## **CHROMIAN SPINELS FROM ULTRAMAFIC-MAFIC INTRUSIONS KIVACH AND PETUSJARVI (SOUTH-WEST KARELIA)**

### **Abstract**

The article presents the results of microprobe researches of accessory chromian spinels from ultramafic-mafic rocks of intrusions Kivach and Petusjarvi. These intrusions are located north-east of Hautavaara greenstone belt within Karelian province of the Fennoscandian Shield. There are slightly differentiated dike-shaped bodies. Chromian spinels are generally represented by solid solution of chromite, magnetite and hercynite. The possible trend of their chemical composition evolution is decrease of Cr and Al contents and increase of Fe contents. Also, this article presents the comparison of the chemical compositions of chromian spinels hosted by rocks of Kivach and Petusjarvi with the ones of some other high-Mg rocks of the Karelia region.

### **Keywords:**

*Kivach, Petusjarvi, ultramafic-mafic intrusions, chromian spinels.*

### **Введение**

Ультрамафит-мафитовый кивачский интрузивный комплекс расположен в пределах Балтийского щита, к северо-востоку от Хаутоваарской зеленокаменной структуры. Массивы изучались с 1930-х гг. на предмет Cu-Ni, а впоследствии и на платинометалльное оруденение, но были признаны бесперспективными. Однако необычный химический состав пород этих интрузий, одновременно высоко-Si и высоко-Mg, делает их интересными для исследования. Изучение аксессуарных хромшпинелидов может быть полезным для сопоставления пород комплекса с другими высоко-Mg сериями.

### **Объекты исследования**

Кивачский комплекс представлен дайкообразными интрузиями, которые образуют субмеридианальный пояс, протяженностью около 30 км и шириной 1–3 км. Он состоит из кулисообразно размещенных относительно самостоятельных тел, приуроченных к глубинному разлому. Массивы крутопадающие, длина отдельных интрузий от сотен метров до 12 км. Они могут быть разбиты на отдельные блоки разрывами северо-восточного и северо-западного простирания со смещением относительно друг друга (Попов и др., 1976; Металлогения..., 1999; Шолохнев и др., 2007).

Наиболее крупные из интрузивных тел — Кивачский массив и массив Петусъярви — являются основными объектами изучения.

Массив Кивач расположен на севере дайкового пояса. Интрузив в пределах его изученной части имеет протяженность около 3,5 км, его максимальная мощность 500–600 м. Форма тела дайкообразная, она осложнена отторженцами и ксенолитами вмещающих пород, а также апофизами. Ксенолиты имеют линзовидную форму, согласную с простиранием массива. Направление падения поверхностей контактов массива различное: восточного — на восток, а западного — на запад. Среди вмещающих пород массива преобладают гранитоиды тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации (Морозов и др., 1973; Шолохнев и др., 2007).

Массив Петусьярви расположен в южной части пояса. Интрузив полностью перекрыт четвертичными отложениями и изучен по двум профилям скважин в центральной части массива и двум скважинам в его южной части.

Петусьярви, как и массив Кивач, представляет собой крутопадающую дайку. Длина интрузии составляет более 10 км, мощность в пределах изученной области изменяется от 170–180 м на севере, до 95–100 м на юге. Падение интрузива моноклинальное, на восток. Массив осложнен рядом апофиз. Ультрамафитовая зона массива Петусьярви метаморфизована и представлена тремолит-талковыми сланцами. В остальном породы массива преобразованы слабо, только вдоль дизъюнктивных зон. Вмещающие породы основной части массива представлены амфиболитами, амфибол-биотитовыми сланцами и биотито-кварцевыми плагиосланцами Улялегской зеленокаменной структуры. Северная оконечность массива пересекает контакт вулканогенно-осадочных пород и гранитоидов ТТГ-ассоциации и залегает в пределах последних (Кравцова и др., 1971; Морозов и др., 1973; Попов и др., 1976; Шолохнев и др., 2007).

Массивы Кивач и Петусьярви дифференцированы. Наблюдается смена пород от ультрамафитов у западного контакта к мафитам на восточном (Морозов и др., 1973; Попов и др., 1976). Авторами отчетов и статей 1970-х гг. интрузии кивачского комплекса были отнесены к массивам перидотит-габброноритового комплекса, в их составе были выделены перидотиты, пироксениты и габбронориты (Кравцова и др., 1971; Морозов и др., 1973; Попов и др., 1976). Однако ряд наименований пород, приведенных в данных работах, например «перидотиты» и «пироксениты», не соответствуют современной классификации и нуждаются в пересмотре (Классификация..., 1997). Согласно более поздним фондовым материалам, массивы преимущественно сложены различными по составу габброноритами, в меньшей степени — пироксенитами (Шолохнев и др., 2007). Макроскопически породы черные или коричневато-темно-серые, крупно-среднезернистые, массивные. Структуру можно описать как гипидиоморфную с элементами пойкилитовой.

Породообразующие минералы представлены оливином, ромбическим пироксеном, моноклинным пироксеном, плагиоклазом. Оливин (*Fa* 12–16) представлен самостоятельными крупными зернами, а также пойкилитовыми вкрапленниками в кристаллах ортопироксена.

Ортопироксен (бронзит) образует призматические зерна, резко идиоморфен по отношению к плагиоклазу. Нередко имеет зональное строение с более железистой краевой частью (от *Fs* 8–10 в центре зерен до *Fs* 20–23 в краевых зонах). Клинопироксен (авгит) может быть идиоморфным и ксеноморфным. Иногда он обрастает кристаллы ортопироксена и корродирует их. Клинопироксен часто также зонален. Плагиоклаз (андезин-лабрадор *An* 48–55) образует удлиненнопризматические индивиды или крупные таблитчатые кристаллы до 1–1,5 см, которые пойкилитово включают в себя зерна мафических минералов. Второстепенные и акцессорные минералы — кварц, биотит, хромит, магнетит, сульфиды. Вторичные минералы — тальк, амфибол (Металлогения..., 1999; Шолохнев и др., 2007).

Химический состав пород кивачского комплекса характеризуется повышенным содержанием  $\text{SiO}_2$  (52,7 %) и одновременно высоким содержанием  $\text{MgO}$  (20,4 %). Средний состав пород кивачского комплекса схож с составами коматиитовых базальтов (Металлогения..., 1999).

## Материал и методика исследований

Каменный материал для написания данной статьи был предоставлен В. А. Богачевым (специализированная фирма «Минерал» (СФ «Минерал»)). Из него впоследствии было изготовлено четыре прозрачно-полированных препарата. Работа написана на основе электронно-микроскопических исследований, произведенных в лаборатории Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ) (аналитик А. В. Антонов) и в лаборатории Института геологии и геохронологии докембрия РАН (ИГГД РАН) (аналитик О. Л. Галанкина).

## Результаты

Хромшпинелид — характерный аксессуар пород комплекса. Отмечается в виде изометричных, гипидиоморфных или ксеноморфных зерен, представляющих собой включения в ортопироксене и оливине, обнаружено также единичное зерно — вкрапленник в клинопироксене. Идиоморфные и гипидиоморфные зерна, как правило, имеют сглаженные грани. Зерна встречаются как поодиночке, так и в небольших скоплениях.

По данным микрондовых исследований, хромшпинелиды преимущественно представляют собой твердые растворы хромита ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), магнетита ( $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ) и герцинита ( $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ) (рис. 1). Существенно хромистые шпинелиды преобладают (Cr: 1,4–0,8 ф. е.,  $\text{Fe}^{3+}$ : 0,1–0,6 ф. е.), однако также отмечаются зерна с примерно равным содержанием хромитовой и магнетитовой молекулы, а также с небольшим преобладанием магнетитового минала над хромитовым (Cr: 0,6 ф. е.,  $\text{Fe}^{3+}$ : 1,1 ф. е.). Алюминий присутствует практически во всех проанализированных шпинелидах, его содержание варьирует от 0,2 до 0,5 ф. е. и в среднем составляет 0,3 ф. е. В хромшпинелидах постоянно присутствует Ti (0,01–0,6 ф. е.), часто отмечается Mg (0–0,5 ф. е.), Mn (0–0,03 ф. е.). Также может присутствовать примесь Zn (0–0,02 ф. е.) и V (0–0,01 ф. е.).

В шпинелидах с уменьшением содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  наблюдается возрастание содержания FeO,  $\text{TiO}_2$ , уменьшение  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , MgO и, возможно, неотчетливо ZnO (рис. 2–5).

Магнезиальность (#mg) хромшпинелидов кивачского комплекса, как правило, невелика, обычно 3–8 %, но в двух анализах повышена (около 15 %). Отмечаются также два зерна существенно хромистых шпинелидов с очень высокой #mg (34–48 %). Эти зерна можно считать твердыми растворами хромита, магнезиохромита ( $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ ), магнетита и герцинита (рис. 6).

В кристаллах, пойкилитово включенных в оливин или расположенных в непосредственной близости от него, отмечается наиболее высокое содержание Fe среди проанализированных шпинелидов, низкие содержания Cr и Al, а также пониженные значения Ti. На диаграмме  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –MgO видно, что при равных содержаниях хрома в зернах шпинелидов, ассоциирующих с оливином, отмечаются несколько большие содержания MgO по сравнению с зернами-вкрапленниками в ортопироксене (рис. 5).

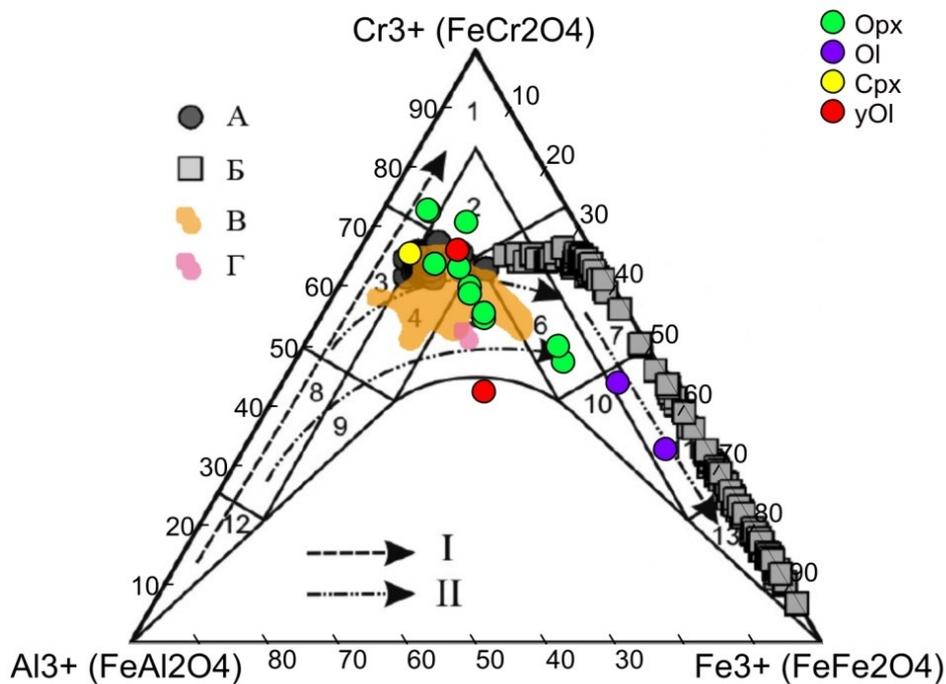


Рис. 1. Составы шпинелидов кивачского комплекса на классификационной диаграмме Н. В. Павлова. Построение диаграммы осуществлялось в ПО TriQuick (автор Д. В. Доливо-Добровольский, ИГГД РАН, <http://dimadd.ru/ru/>). Условные обозначения: Opx — хромшпинелид, включение в ортопироксене; Ol — в оливине (неполные псевдоморфозы талька и магнетита по оливину); yOl — в ортопироксене, но поблизости расположена псевдоморфоза по оливину; Cpx — в клинопироксене. Цифрами обозначены поля: 1 — хромит, 2 — субферрихромит, 3 — алюмохромит, 4 — субферриалюмохромит, 5 — ферриалюмохромит, 6 — субалюмоферрихромит, 7 — феррихромит, 8 — хромпикотит, 9 — субферрихромпикотит, 10 — субалюмохроммагнетит, 11 — хроммагнетит, 12 — пикотит, 13 — магнетит; I — первичный тренд дифференциации составов хромшпинели из ультрабазитов в верхней мантии, II — вторичные тренды метаморфических преобразований в коровых условиях; А — составы первично-магматических ядер хромшпинелидов из коматиитов Совдозерской структуры (Светов и др., 2014); Б — составы вторичных шпинелидов коматиитов Совдозерской структуры (Светов и др., 2014); В — составы хромшпинелидов ультраосновной зоны Шалозерско-Бураковского тела Бураковского массива (Чистяков, Шарков, 2008); Г — составы хромшпинелидов пироксенитовой зоны Шалозерско-Бураковского тела Бураковского массива (Чистяков, Шарков, 2008)

Fig. 1. Chemical compositions of chromian spinels from rocks of Kivachsky complex on the classification diagram of N. V. Pavlov. The diagram is plotted in the TriQuick

software (the author is D. V. Dolivo-Dobrovolsky, IPGG RAS, <http://dimadd.ru/ru/>).

The legend: Opx — inclusion of chromian spinel in orthopyroxene;

Ol — in olivine (partial pseudomorphs of talc and magnetite over olivine),

yOl — in orthopyroxene (the pseudomorph of talc and magnetite over olivine located nearby); Cpx — in clinopyroxene. Numbers mark the areas of:

1 — chromite, 2 — subferrichromite, 3 — alumochromite, 4 — subferrialumochromite, 5 — ferrialumochromite, 6 — subalumoferrichromite, 7 — ferrichromite,

8 — chrompicotite, 9 — subferrichrompicotite, 10 — subalumochrommagnetite,

11 — chrommagnetite, 12 — picotite, 13 — magnetite; I — the primary trend of

differentiating the chemical compositions of chromian spinels from ultrabasic rock in upper mantle, II — secondary trends of metamorphic transformations in crust

conditions; A — chemical compositions of primary-magmatic core of chromian spinels from komatiites of Sovdozero greenstone belt (Svetov et al., 2014);

Б — chemical compositions of secondary chromian spinels from komatiites of Sovdozero greenstone belt (Svetov et al., 2014); B — chemical compositions of

chromian spinels from ultrabasic zone of Shalozero-Burakovsky body of the Burakovsky pluton (Chistyakov, Sharkov, 2008); Г — chemical compositions of

chromian spinels from Pyroxenite zone of Shalozero-Burakovsky body of the Burakovsky pluton (Chistyakov, Sharkov, 2008)

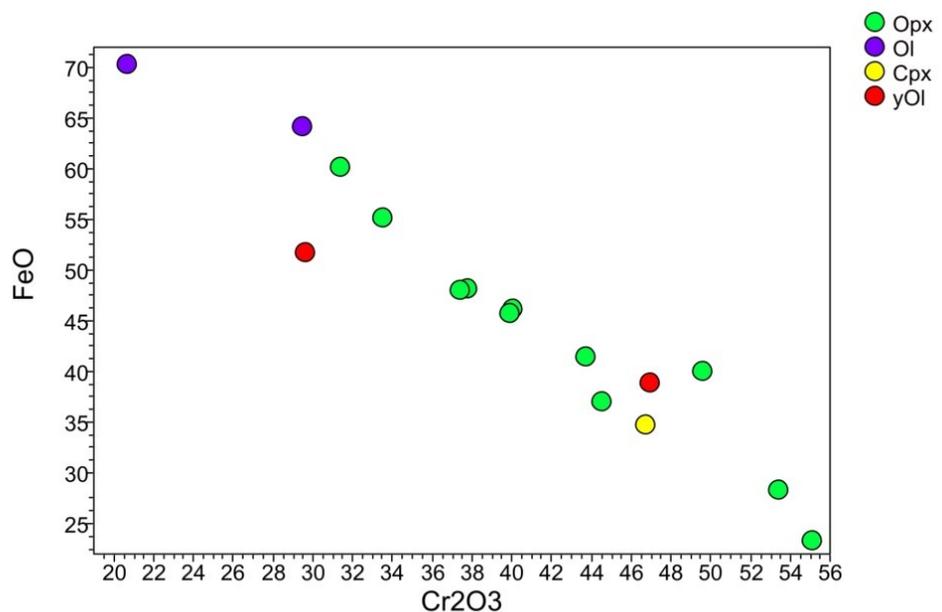


Рис. 2. Вариационная диаграмма  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –FeO.

Условные обозначения — см. рис. 1

Fig. 2. Variation diagram  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –FeO. For the legend see Fig. 1

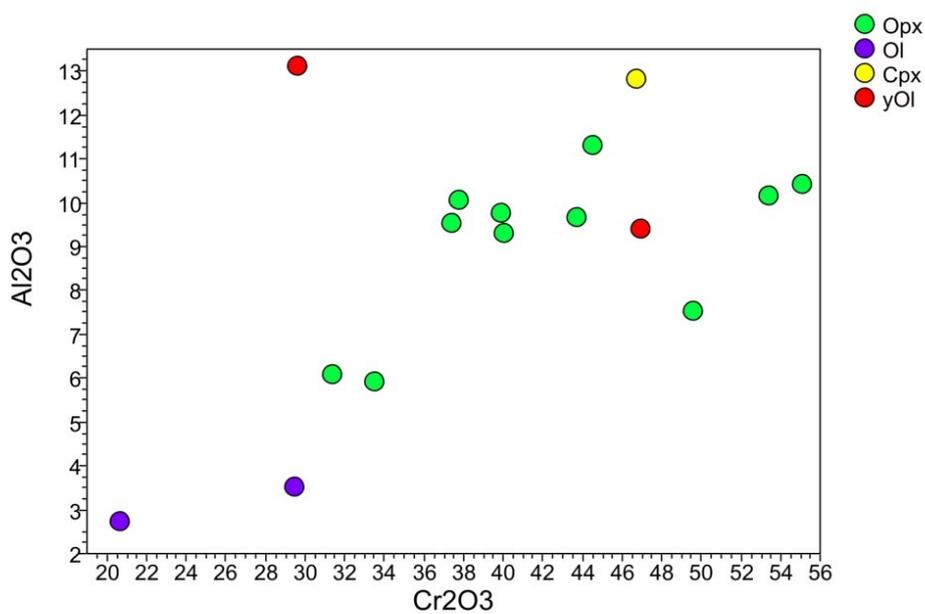


Рис. 3. Вариационная диаграмма Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  
Условные обозначения — см. рис. 1

Fig. 3. Variation diagram Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. For the legend see Fig. 1

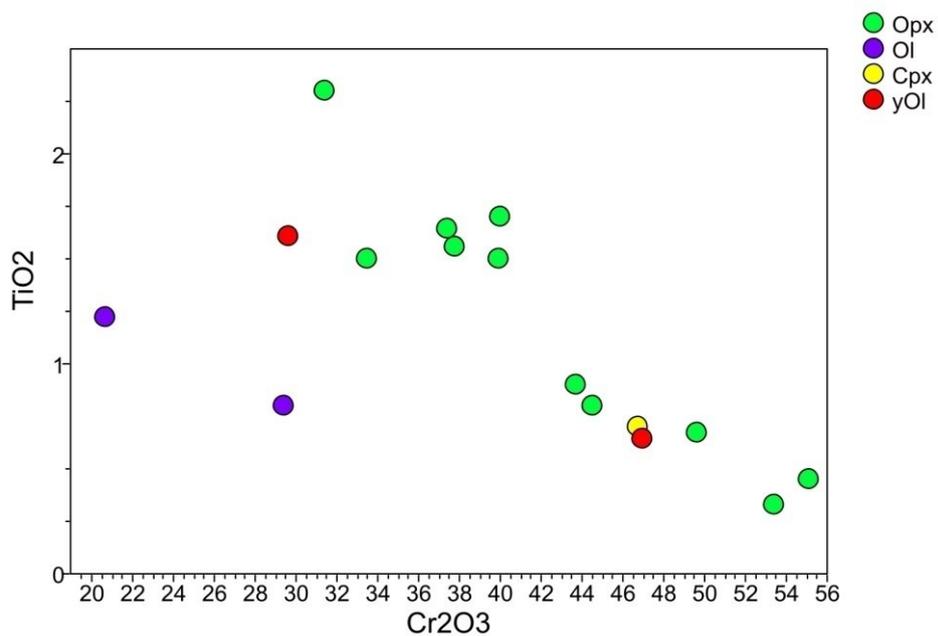


Рис. 4. Вариационная диаграмма Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>.  
Условные обозначения — см. рис. 1

Fig. 4. Variation diagram Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>. For the legend see Fig. 1

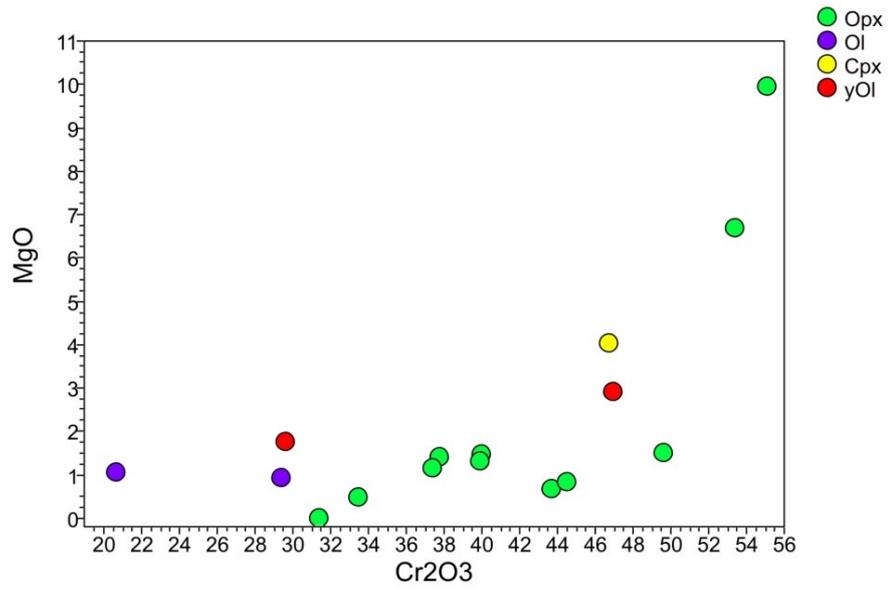


Рис. 5. Вариационная диаграмма Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO.

Условные обозначения — см. рис. 1

Fig. 5. Variation diagram Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO. For the legend see Fig. 1

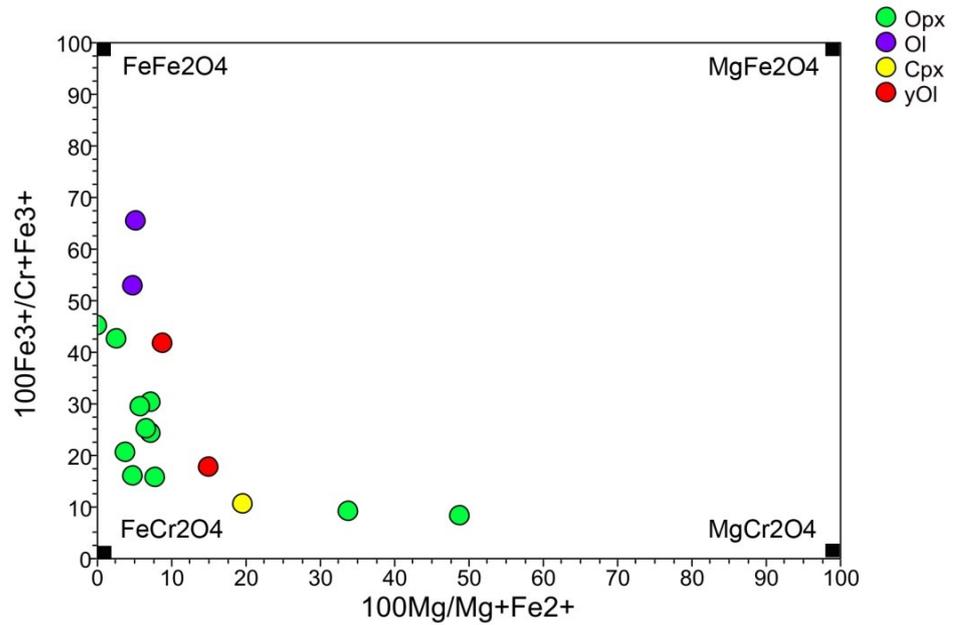


Рис. 6. Диаграмма FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>–MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>–MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>–FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Условные обозначения — см. рис. 1

Fig. 6. Diagram FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>–MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>–MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>–FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. For the legend see Fig. 1

## Обсуждение результатов

В ходе данной работы было произведено сравнение составов хромшпинелидов кивачского комплекса и шпинелидов некоторых высоко-Mg пород. Как видно из диаграммы (рис. 1), составы наиболее хромистых шпинелидов Кивача и Петусъярви в целом хорошо сопоставимы с составами первично-магматических шпинелей из коматиитов Совдозерской зеленокаменной структуры, а также из ультраосновной и пироксенитовой зон Шалозерско-Бураковского тела Бураковского плутона. От шпинелидов Бураковского массива хромиты интрузий кивачского комплекса отличаются более низким содержанием MgO (в среднем около 1–1,5 % по сравнению с 4,9–8,4 % в ультраосновной зоне и 3,5–4,4 % в пироксенитовой зоне), а также отсутствием примеси никеля.

Вероятно, основной тренд эволюции составов хромшпинелидов Кивача и Петусъярви — одновременное уменьшение содержания Cr, Al и возрастание Fe (рис. 1). На содержания данных компонентов в хромшпинелидах могут оказывать влияние такие параметры их образования, как состав расплава, его водонасыщенность, давление при кристаллизации, степень метаморфических изменений. Чтобы оценить вклад того или иного параметра в формирование составов исследуемых шпинелидов, требуются дополнительные исследования. Исходя из анализа трендов шпинелидов Совдозерской структуры и кивачского комплекса можно было бы предположить, что часть зерен хромитов Кивача и Петусъярви отвечают первично-магматическим минералам, а часть — измененным в ходе метаморфизма, однако каких-либо отличий в морфологии и структурной позиции исследуемых зерен обнаружить не удалось. Возможно, данный тренд имеет магматическую природу.

## Выводы

На основании работы можно сделать следующие заключения.

Хромшпинелиды в целом представлены твердыми растворами хромита, магнетита и герцинита. Как правило, отмечается преобладание хромитового минала.

Основной тренд эволюции составов хромшпинелидов — одновременное уменьшение содержания Cr и Al и рост содержания Fe. Для того чтобы определить природу тренда, необходимы дополнительные исследования.

Составы хромшпинелидов Кивача и Петусъярви сопоставимы с составами первично-магматических шпинелей из коматиитов Совдозерской зеленокаменной структуры, а также из ультраосновной и пироксенитовой зон Шалозерско-Бураковского тела Бураковского плутона.

Хочется выразить благодарность В. В. Иваникову, Ш. К. Балтыбаеву, М. В. Малашину и О. Л. Галанкиной за всестороннее содействие в написании работы. Отдельно хочется поблагодарить В. А. Богачева, ведущего геолога СФ «Минерал», за предоставленный фактический материал.

## Литература

*Классификация* магматических (изверженных) пород и словарь терминов (Рекомендации подкомиссии по систематике изверженных пород Международного союза геологических наук) / пер. с англ. С. В. Ефремовой. М.: Недра, 1997. 248 с.

*Кравцова Л. С. и др.* Разработка геохимических критериев для оценки перспектив никеленосности массивов ультраосновных и основных пород Карелии, 1971 // ФГУ «ТФГИ по СЗФО», инв. № 21500.

*Металлогения Карелии* / под ред. С. И. Рыбакова и А. И. Голубева. Петрозаводск: КНЦ РАН, 1999. 340 с.

*Морозов С. А. и др.* Отчет Южно-Карельской партии о геологических работах на медь и никель на Кивачском и Сямозерском объектах в Суоярвинском и Пряжинском районах КАССР в 1970–73 гг., 1973 // ФГУ «ТФГИ по СЗФО», инв. № 22074.

*Попов М. Г., Морозов С.А., Кравцова М. И.* Перидотит-габброноритовый массив Петусъярви // Интрузивные базит-ультрабазитовые комплексы Карелии / под ред. А. И. Богачева. Л.: Наука, 1976. С. 109–117.

*Светов С. А., Рыбникова З. П., Вревский А. Б.* Реконструкция Р-Т параметров генерации и излияния мезоархейских коматиитовых расплавов по данным изучения акцессорных шпинелидов // Вестник СПбГУ. 2014. Сер. 7, вып. 4. С. 19–36.

*Чистяков А. В., Шарков Е. В.* Петрология раннепалеопротерозойского бураковского комплекса, Южная Карелия // Петрология. 2008. Т. 16, № 1. С. 66–91.

*Шолохнев В. В., Богачев В. А. и др.* Оценка платиноносности крупных расслоенных массивов Карело-Кольского региона, 2007 // Геолфонд ФГБУ «ВСЕГЕИ», инв. № 18724.

*TriQuick* [Электронный ресурс] // Дмитрий Доливо-Добровольский. Личные страницы: сайт. URL: <http://dimadd.ru/ru/Programs/triquick> (дата обращения: 28.07.2019).

#### *Сведения об авторе*

**Анисимов Роман Леонидович**

младший научный сотрудник, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, romjulleoanis@mail.ru

**Anisimov Roman Leonidovich**

Junior Researcher, Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, romjulleoanis@mail.ru