

32. Wheeler R. L., Bufe C. G., Johnson M. L., Dart R. L. Seismotectonic Map of Afghanistan, with Annotated Bibliography : Open-File Report 2005–1264. Reston : U.S. Geological Survey, 2005. 34 p.
33. Kalinin D. F., Egorov A. S., Bolshakova N. V. Oil and gas potential of the West Kamchatka coast and its relation to the structural and tectonic structure of the Sea of Okhotsk region based on geophysical data. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2022. No. 1(53). pp. 59–75.
34. Glazunov V. V., Ageev A. S., Gorelik G. D., Sarapulkina T. V. Results of comprehensive geophysical studies on the search for crypts on the territory of suburban necropolis of Tauric Chersonese in the Karantinnaya Balka. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 12–19.
35. Nedosekova I. L. Carbonatite complexes of the South Urals: Geochemical features, ore mineralization, and geodynamic settings. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 255. pp. 349–368.
36. Sadykova Z. I., Movchan I. B., Yakovleva A. A., Goglev D. A. Technology for integrated geological and geophysical interpretation of data obtained using UAVS on the example of a site in the Murmansk region. *Geology and Minerals of the West Ural : Collected Papers*. Perm, 2023. No. 6(43). pp. 161–169.

УДК 552.3:552.13:551.2(99)

ОЛИВИН-ШПИНЕЛЕВАЯ ГЕОТЕРМОМЕТРИЯ – ИНДИКАТОР ФОРМАЦИОННОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПОРОД И ОСНОВА ДЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ АНТАРКТИДЫ*



И. В. ТАЛОВИНА¹,
зав. кафедрой, проф.,
д-р геол.-минерал. наук,
i.talovina@gmail.com



И. А. БАБЕНКО¹,
аспирант



Р. К. ИЛАЛОВА¹,
доцент, канд. геол.-минерал. наук



А. М. ДУРЯГИНА²,
канд. геол.-минерал. наук

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

² Институт минералогии Фрайбергской горной академии, Фрайберг, Германия

Введение

С середины XX в. различными специалистами была обоснована возможность использования закономерных изменений химических составов оливина и шпинели в геотермометрии ультрамафитов и мафитов [1–4]. С тех пор установлен комплекс геотермометров, отдельные из которых применяют и сегодня. Как правило, основная их часть использует коэффициент распределения железа и магния между оливином и шпинелью.

Приведены результаты изучения составов породообразующих и акцессорных минералов различных мафитовых и ультрамафитовых формаций. Рассчитаны и проанализированы температуры образования горных пород на основании четырех оливин-шпинелевых геотермометров для разных формаций ультрамафитов и мантийных ксенолитов на примере Антарктиды, Монголии, Урала и других регионов. Отмечено, что температуры оливин-шпинелевого равновесия в породах офиолитовых зональных и расслоенных массивов оказываются сопоставимыми, а в мантийных ксенолитах – повышенными по отношению к ним. Сделан вывод о применимости основных версий геотермометров для вычисления температур мафит-ультрамафитовых систем для реконструкции геодинамических условий формирования различных блоков земной коры. Рассмотрены некоторые типоморфные индикаторы формационной принадлежности горных пород, а именно: отношение Ni:Mn в оливине и железистость в хромшпинелиде.

Ключевые слова: геотермометрия, формации, ультрамафиты, мафиты, оливин, шпинель, Антарктида
DOI: 10.17580/gzh.2024.09.12

В последнее время ряд отечественных и зарубежных геологов демонстрируют применимость данных геотермометрии при моделировании и реконструкции формирования различных участков земной коры [5]. Известно, что в разных геодинамических обстановках образуются разные формации ультрамафитов и мафитов. Таким образом, есть основания считать, что химические особенности составов породообразующих и акцессорных минералов этих пород будут различными. Интересным представляется опробование методов геотермометрии на породах ультрамафитовых и мафитовых комплексов Антарктиды, на территории которой выделяют все известные геодинамические обстановки [6–8]. Это позволит лучше понять геологическую природу этого региона и оценить его роль в общей картине глобальной

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024–0003. Фундаментальные междисциплинарные исследования геологических образований Антарктиды в районе станции Восток).



Рис. 1. Тектоническая карта Антарктиды [14]

геодинамики. На основании данных о химическом составе оливинов и шпинелей разных геологических формаций можно рассчитать температуру их кристаллизации и реконструировать геодинамические условия формирования различных блоков земной коры. Особую актуальность данный подход приобретает при работах в труднодоступных районах для непосредственного изучения территорий, таких как Антарктический континент [8].

Актуальность исследований

Открытый в XIX в. континент Антарктида до сих пор остается одной из наименее изученных областей планеты. В настоящее время особенности геологического строения данного материка изучают специалисты со всего мира [9–12]. В геоструктурном плане на территории Антарктиды выделяют два основных элемента [13, 14] (рис. 1):

Восточно-Антарктическую платформу, занимающую большую часть континента и представляющую собой древний кратон, фрагментарно перекрытый осадочным чехлом;

Тихоокеанский подвижный пояс (ТПП), состоящий из разнообразных по строению, протяженности и времени формирования складчатых систем.

Описанные выше геоструктурные элементы разделены Трансантарктическими горами, простирающимися практически через весь континент, которые в последнее время рассматривают как часть ТПП [13]. Хребет сформирован породами различного возраста от архейского до современного. Эта орогенная система фиксирует разнообразные тектонические режимы, проявляющиеся на протяжении всего этого времени, включая континентальный рифтогенез, конвергентный

краевой орогенез, формирование внутрикратонных и предгорных бассейнов, апвеллинг мантии и другие процессы. Таким образом, территория Антарктиды является отличным полигоном для тестирования и применения методов геотермометрии.

Формации плутонических и вулканических ассоциаций мафитов и ультрамафитов

Ультрамафитовые и мафитовые породы несут ключевую информацию о составе глубинных зон земной коры и мантии, а также об особенностях процессов, развивающихся в мантийных и коровых системах [15, 16]. Классификация магматических формаций основана на структурно-тектоническом принципе и вещественном составе горных пород [15]. Среди ультрамафитов и мафитов выделяют следующие формации.

Офиолитовая (иначе – дунит-перидотитовая, альпинотипная, габбро-перидотитовая) формация, объединяющая комплексы бесполевошпатовых ультрамафитовых пород (главным образом – гарцбургитов, дунитов и лерцолитов), обычно интенсивно или даже полностью серпентинизированных, с которыми в резко подчиненном количестве ассоциируют верлиты и ортопироксениты; с ультрамафитами во времени и пространственно сопряжены габбро, габбро-долериты и другие породы. Образования данной формации формируют вытянутые пояса, являющиеся реликтами древней океанической коры, приуроченные к ядрам коллизионных орогенов.

Формация зональных массивов (иначе – дунит-клинопироксенит-габбровая) сложена концентрически-зональными массивами, имеющими дунитовое ядро и клинопироксенит-габбровую оболочку. Иначе их называют массивами

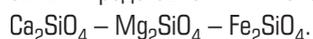
уральско-аляскинского типа. Эти массивы образуют цепочки или пояса длиной в несколько сотен километров, сформированные в геодинамических обстановках субдукционного типа. Как правило, они достаточно молодые и имеют преимущественно фанерозойский возраст. Петрохимически ультрамафиты зональных массивов аналогичны офиолитовым.

Формация расслоенных массивов (иначе – пироксенит-перидотитовая). Расслоенные интрузии кристаллизуются главным образом из базальтовой магмы, часто образуя крупные массивы, в строении которых выделяется чередование выдержанных горизонтов магматических пород, залегающих наподобие стратифицированных образований и демонстрирующих процессы эволюции магмы в магматических камерах [17–19]. Расслоенные интрузии часто рассматривают как производные плюмов. Подобные массивы отличаются крайним разнообразием, обусловленным различной степенью плавления первичного мантийного субстрата, дифференциацией магм, их характером и степенью контаминации, флюидным режимом и другими факторами [20]. В строении массивов данной формации принимают участие ультраосновные породы: дуниты, гарцбургиты, ортопироксениты и основные: нориты, габбро-нориты, троктолиты.

Методика исследований

Электронно-микроскопные исследования (более 100 определений) состава оливин и хромшпинели проводили на растровом микроскопе JEOL JSM 6400 с энергодисперсионной приставкой Explorer компании Noran и JXA-8900RL в лаборатории Фрайбергской горной академии (аналитик – д-р У. Кемпе (U. Kempe)).

Семейство оливина – важная породообразующая группа минералов. Оливин является наиболее распространенным компонентом верхней мантии Земли и в большом количестве содержится в основных и ультраосновных породах. Под термином оливин подразумевают серию твердых растворов форстерит-фаялита. Состав большинства оливинов может быть представлен в системе



Хромшпинелиды – характерные акцессорные минералы ультраосновных, реже – основных пород. Они являются одной из первых фаз кристаллизации ультраосновных расплавов, из которых выделяются совместно с оливином или же до него. Хромшпинелиды представляют собой твердые растворы с обобщенной формулой $A^{2+}B_2^{3+}O_2$, среди которых выделяются три основные серии: серия шпинели с доминирующим ионом Al^{3+} ; серия магнетита с ионом Fe^{3+} ; серия хромита с ионом Cr^{3+} [21].

Оливин-шпинелевая геотермометрия позволяет получать важную информацию о геодинамических и физико-химических обстановках образования мафитовых и ультрамафитовых пород. Сегодня все чаще данную методику применяют при реконструкции

геохимической характеристики мантийных источников расплавов, геодинамической обстановки, термобарического режима в ходе магмогенерации и дифференциации первичных расплавов [22]. Оливин-шпинелевые геотермометры потенциально работают в широком диапазоне температур: от самых высоких (до 650 °C) и вплоть до прекращения элементного обмена.

В основе оливин-хромшпинелевой геотермометрии лежит закономерная диффузия $Mg-Fe^{2+}$ в парагенезисе оливин-хромшпинелид. Диффузионный обмен оливина и хромшпинели приводит к колебаниям значения параметра магнезиальности $Mg\# = \left(\frac{Mg}{Mg+Fe^{2+}} \right)$ [23, 24]. Кроме того, в конце XX в. был предложен оливин-шпинелевый геотермометр, работающий на распределении алюминия между двумя минералами [25]. Тем не менее наличие алюминия в оливине обычно ограничивается крайне ничтожными количествами, часто даже ниже уровня обнаружения, что не всегда позволяет полагаться на универсальность этого геотермометра.

Для расчетного вычисления температуры кристаллизации ультраосновных и основных расплавов в настоящее время, как правило, используют четыре оливин-хромшпинелевые геотермометра: Джексона – Ирвайна – Редера [1], Оно [2], Фабри [3] и О'Нейла – Уолла – Бэллхауза – Берри – Грина (O'NWBBG) [4]:

- геотермометр Джексона – Ирвайна – Редера (Д.И.Р.):

$$T = \frac{3480 \cdot 2\alpha + 1018\beta + 2400 - 1720\gamma}{2,23\alpha + 2,56\beta + \ln K_D \cdot 1,987 - 3,08\gamma - 1,47};$$

- геотермометр Оно: $T = \frac{0,057 + 0,34 \cdot 10^4}{\ln K_D + 0,934Cr'' - 0,102};$

- геотермометр Фабри: $T = \frac{4250\alpha + 1343}{\ln K_D^0 + 1,825\alpha + 0,571};$

- геотермометр О'Нейла – Уолла – Бэллхауза – Берри – Грина (O'NWBBG):

$$T = \frac{(6530 + 280P + 7000 + 108P)(1 - 2Fa) - 1960(1 - 2f) + 16150\alpha + 25150(\gamma + X_{Ti})}{R \ln K_D + 4,705},$$

где T – температура, К; α , β , γ – атомные доли Cr, Al, Fe^{3+} по отношению к их сумме в хромшпинелиде соответственно;

$$K_D = \frac{(X_{Mg}^{Ol} f)}{(X_{Mg}^{Sp} Fa)}, \text{ где } X_{Mg} = \frac{Mg}{Mg+Fe} \text{ в оливине (Ol) и хромшпинелиде (Sp) соответственно; } f = \frac{Fe^{2+}}{Fe^{2+} + Mg} \text{ в хромшпинелиде; } Fa = \frac{Fe}{Fe + Mg} \text{ в оливине; } Cr'' = \frac{Cr}{Cr + Al} \text{ в хромшпинелиде; } K_D^0 =$$

$= \ln K_D - 4\gamma$; P – давление, ГПа; X_{Ti} – количество катионов Ti в формуле шпинели на 3 катиона; R – универсальная газовая постоянная.

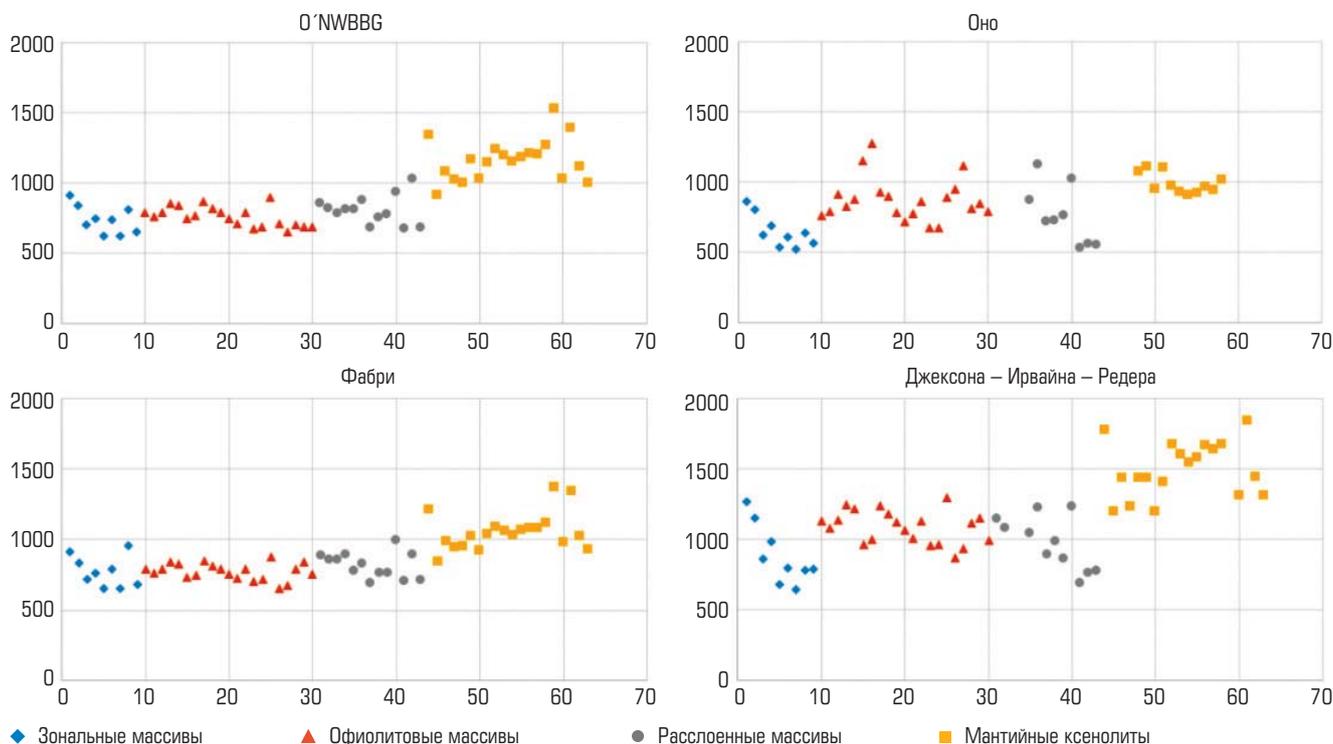


Рис. 2. Температуры оливин-шпинелевого равновесия, рассчитанные на основании четырех геотермометров: по вертикальной оси – температура, °С; по горизонтальной – номер расчета

На основании собственных данных [26], а также информации, полученной из открытых источников, авторами были рассчитаны геотермометры для мантийных ксенолитов Антарктиды: Оазис Джетти [27], крупная изверженная провинция Кару [28], вулкан Гауссберг [9], Бивер Лейк [29]; Монголии (Плато Дариганга [30]), а также для пород формаций зональных массивов (Нижнетагильский, Светлоборский [26], Вересовоборский [31]); офиолитовых массивов (Кемпирсайский [32], Крака [33], Калнинский, Агардакский [31] массивы); расслоенных массивов (Бураковский [34], Талажинский [31], Ловозерский [27]).

Обсуждение результатов

В теории термометрии предполагается, что температуры, полученные с использованием перечисленных геотермометров, являются постоянными и не зависят от вариаций состава оливина и шпинели. Однако на практике результаты оценки температур равновесия, рассчитанные с применением различных геотермометров, часто оказываются неоднозначными. К полученным значениям необходимо относиться с некоторой осторожностью из-за того, что последующие за кристаллизацией процессы могли оказывать влияние на систему и не всегда представляется возможным их учесть. В соответствии с выполненными авторами расчетами и на основании [31] можно сделать следующие выводы относительно применения оливин-хромшпинелевых геотермометров (**рис. 2**):

- рассчитанные данные показывают непротиворечивость и хорошую сходимость; согласно проведенному статистическому анализу, коэффициенты корреляции находятся в пределах 0,6–1, что свидетельствует об умеренном и сильном сходстве;
- для рассмотренных в работе массивов отмечена сходимость версий геотермометров O'NWBBG, Фабри и Оно, в то время как геотермометр Джексона – Ирвайна – Редера часто завышает расчетную температуру и является наименее показательным;
- при использовании геотермометра Оно в некоторых расчетах отмечается anomalous завышение температур; по мнению авторов [31], на это влияет значение параметра хромистости в геотермометре, который в ряде случаев не работает;
- в целом температуры, рассчитанные для офиолитовых, зональных и расслоенных массивов, оказываются сопоставимыми; при этом температуры оливин-шпинелевого равновесия, рассчитанные для мантийных ксенолитов горячих точек, оцениваются ощутимо выше.

Некоторые геохимические соотношения в оливине и хромшпинели оказываются весьма информативными, что позволяет использовать их при выполнении геодинамических реконструкций и определении формационной принадлежности пород. Так, отношение $Ni:Mn > 2$ в оливине характерно для пород офиолитовой ассоциации и мантийных ксенолитов.

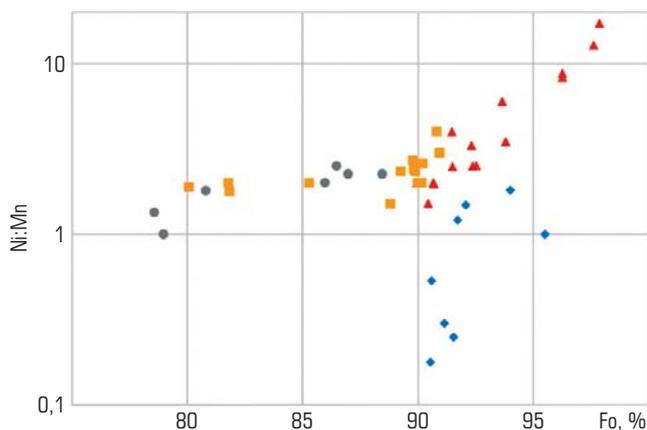


Рис. 3. Соотношение Ni:Mn в оливине к форстеритовому миналу Fo (компонент – Mg_2SiO_4)

Для остальных формаций, за некоторым исключением, это значение оказывается существенно ниже (рис. 3). Для пород зональной и расслоенной формаций характерны повышенные (0,6–0,7) значения параметра f в хромшпинелиде, в то время как для офиолитов и мантийных ксенолитов эти значения оказываются минимальными (0,3–0,4).

Заключение

Оливин-шпинелевая геотермометрия позволяет получать важную информацию о геодинамических и физико-химических обстановках образования ультрамафитовых и мафитовых пород. Полученные данные свидетельствуют о сопоставимых температурах оливин-шпинелевого равновесия в офиолитовых, зональных и расслоенных формациях. Температуры формирования мантийных ксенолитов оказываются при этом ощутимо выше. По результатам исследования, наиболее

применимыми геотермометрами, основанными на диффузионном обмене $Mg-Fe^{2+}$, являются геотермометры O'NWBBG, Фабри и Оно. При этом в отдельных измерениях отмечается неоправданное завышение температуры, рассчитанной с применением геотермометра Джексона – Ирвайна – Редера. Следует заметить, что не всегда полученные значения соответствуют действительности в силу влияния следующих после кристаллизации геологических процессов (метаморфизма, метасоматоза и др.) [35]. При этом, имея данные о геохимическом составе ядра и краев минералов, можно восстановить начальную и уравновешенную температуры и оценить скорость охлаждения системы.

Показательными индикаторами формационной принадлежности пород являются соотношение Ni:Mn в оливине и параметр железистости хромшпинелида f . Для пород офиолитовой серии и мантийных ксенолитов $Ni:Mn > 2$ и среднее значение параметра $f_{cp} = 0,3 \div 0,4$; для пород зональных и расслоенных массивов значения соотношения Ni:Mn оказываются минимальными, а $f_{cp} = 0,6 \div 0,7$.

Рассчитанные авторами параметры для пород Оазиса Джетти, крупной изверженной провинции Кару, вулкана Гауссберг и Бивер Лейк показывают хорошую сходимость с классическими представителями ультрамафитовых и мафитовых формаций в других областях земного шара, что позволяет рекомендовать использование «протестированных» авторами геотермометров и геохимических соотношений для реконструкции и уточнения геодинамической природы сходных геологических объектов в пределах труднодоступных для непосредственного изучения антарктических территорий.

Библиографический список

См. англ. блок.

«GORNYI ZHURNAL», 2024, № 9, pp. 77–82
DOI: 10.17580/gzh.2024.09.12

Olivine–spinel geothermometry—Indicator of formation identity of rocks and a basis for geodynamic reconstructions in Antarctica

Information about authors

I. V. Talovina¹, Head of Department, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, i.talovina@gmail.com

I. A. Babenko¹, Post-Graduate Student

R. K. Ilalova¹, Associate Professor, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences

A. M. Duryagina², Candidate of Geological and Mineralogical Sciences

¹Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

²TU Bergakademie Freiberg Institute of Mineralogy, Freiberg, Germany

Abstract

The article reports studies on composition of rock-forming and accessory minerals from various mafites and ultramafites. Spotlight is on olivines and Cr spinel which are one of the first crystallization stages informing on chemical and thermodynamic

characteristics of mantle sources and thermobaric regime in the course of magma generation. The temperatures of rock formation were calculated and analyzed using four classic versions of olivine–spinel geothermometer: Jackson–Irvine–Reder, Ono, Fabry and O'Neil–Wall–Ballhaus–Berry–Green (O'NWBBG) for different ultramafites and mantle xenolites as the case-studies of Antarctica, Mongolia, Ural and some other regions. It is mentioned that olivine–spinel equilibrium temperatures are comparable in ophiolites and in zoned and stratified rock masses, and are higher than the temperature of mantle xenolites. It is concluded on applicability of the main versions of olivine–spinel geothermometers in calculation of temperatures in mafites and ultramafites with a view to reconstructing geodynamic formation conditions for different blocks in the Earth crust. Furthermore, the authors analyze some typomorphic indicators of a formation identity of rocks, namely, the Ni:Mn ratio in olivine and the ferrum content f of Cr spinel. It is found that the ratio of Ni:Mn > 2 in olivine is typical of ophiolites and mantle xenolites, and is much lower in other formations. The rocks from zoned and stratified formations feature the higher values of f (0.6–0.7) in Cr spinel, while ophiolites and mantle xenolites display the minimum values of this parameter (0.3–0.4).

The results are important for better and penetrative understanding of formation and evolution of mantle systems, including their geodynamics. Such approach is crucial in

investigation of inaccessible and non-outcropping areas of the Earth crust as conventional analytical techniques are inexecutable in full measure in this case.

The study was carried out under the state contract with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Contract No. FSRW-2024-0003. Basic and Inter-Disciplinary Research of Geological Formations at Vostok Station in Antarctica.

Keywords: geothermometry, formations, ultramafites, mafites, olivine, spinel, Antarctica.

References

- Roeder P. L., Campbell I. H., Jamieson H. E. A re-evaluation of the olivine–spinel geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1979. Vol. 68, Iss. 3. pp. 325–334.
- Ono A. Fe–Mg partitioning between spinel and olivine. *The Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists*. 1983. Vol. 78, Iss. 4. pp. 115–122.
- Jianping L., Kornprobst J., Vielzeuf D., Fabriès J. An improved experimental calibration of the olivine–spinel geothermometer. *Chinese Journal of Geochemistry*. 1995. Vol. 14, Iss. 1. pp. 68–77.
- O'Neill H. S. C., Wood B. J. An experimental study of Fe–Mg partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1979. Vol. 70, Iss. 1. pp. 59–70.
- Sergeeva A. V., Kiryukhin A. V., Usacheva O. O., Rychkova T. V., Kartasheva E. V. et al. The impact of secondary mineral formation on Na–K–geothermometer readings: a case study for the Valley of Geysers hydrothermal system (Kronotsky State Nature Biosphere Reserve, Kamchatka). *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 262. pp. 526–540.
- Grikurov G. E., Leichenkov G. L., Mikhalsky E. V. Antarctic tectonic evolution in the light of modern geodynamic concepts. *Structure and Evolution of the Lithosphere. Series : Russia's Contribution to the 2007/08 International Polar Year*. Moscow–Saint-Petersburg : Paulsen, 2010. pp. 89–108.
- Jacobs J., Mikhalsky E., Henjes-Kunst F., Läufer A., Thomas R. J. et al. Neoproterozoic geodynamic evolution of easternmost Kalahari: Constraints from U–Pb–Hf–O zircon, Sm–Nd isotope and geochemical data from the Schirmacher Oasis, East Antarctica. *Precambrian Research*. 2020. Vol. 342. ID 105553.
- Korago E. A., Kovaleva G. N., Schekoldin R. A., Ilin V. F., Gusev E. A. et al. Geological structure of the Novaya Zemlya Archipelago (West Russian Arctic) and peculiarities of the tectonics of the Eurasian Arctic. *Geotectonics*. 2022. Vol. 56, No. 2. pp. 123–156.
- Migdisova N. A., Sushevskaia N. M., Portnyagin M. V., Shishkina T. A., Kuzmin D. V. et al. Composition of phenocrysts in lamproites of Gaussberg Volcano, East Antarctica. *Geochemistry International*. 2023. Vol. 61, No. 9. pp. 911–936.
- Litvinenko V. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development. *Geochemistry*. 2020. Vol. 80, Iss. 3. ID 125652.
- Gulbin Yu. L., Abdrakhmanov I. A., Gembitskaya I. M., Vasilev E. A. Oriented microinclusions of Al–Fe–Mg–Ti oxides in quartz from metapelitic granulites of the Bunge Hills, East Antarctica. *Geology of Ore Deposits*. 2023. Vol. 65, No. 7. pp. 656–668.
- Bolshunov A. V., Vasilev D. A., Dmitriev A. N., Ignatev S. A., Kadochnikov V. G. et al. Results of complex experimental studies at Vostok station in Antarctica. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 263. pp. 724–741.
- Ageev A., Egorov A., Krikun N. The principal characterized features of earth's crust within regional strike–slip zones. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals : The Russian–German Raw Materials Forum*. London : Taylor & Francis Group, 2021. pp. 78–83.
- Khain V. E., Bozhko N. A. Historical Geotectonics. Pre-Cambrian Age. Moscow : Nedra, 1988. 382 p.
- Chashchukhin I. S., Votyakov S. L. Spinel Ilherzolite of the Northern Kraka Massif (Southern Urals): Relics of the least transformed matter of the upper mantle. *Doklady Earth Sciences*. 2010. Vol. 431, Iss. 2. pp. 462–465.
- Nefedov Yu., Gribanov D., Gasimov E., Peskov D., Han G. et al. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas province fields. *Reliability: Theory & Applications*. 2023. Vol. 18, Special Issue 5(75). pp. 441–448.
- Kovalev S. G., Kovalev S. S. Ti–Fe–Cr spinels in layered (stratified) complexes of the western slope of the Southern Urals: Species diversity and formation conditions. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 255. pp. 476–492.
- O'Connor C., Alexandrova T. The geological occurrence, mineralogy, and processing by flotation of platinum group minerals (PGMs) in South Africa and Russia. *Minerals*. 2021. Vol. 11, Iss. 1. ID 54.
- Scoates J. S., Wall C. J. Geochronology of Layered Intrusions. *Layered Intrusions. Ser.: Springer Geology*. Springer : Dordrecht, 2015. pp. 3–74.
- Smolkin V. F., Mokrushin A. V. Geochemistry of the Paleoproterozoic layered intrusions of the Monchegorsk ore area, Kola region. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*. 2019. No. 16. pp. 544–549.
- Biagioni C., Pasero M. The systematics of the spinel-type minerals: An overview. *American Mineralogist*. 2014. Vol. 99, Iss. 7. pp. 1254–1264.
- Wu J., Liu T., Wang F. Genesis and geodynamic significance of chromitites from the Fuchuan Ophiolite, Southern China, as evidenced by trace element fingerprints of chromite, olivine and pyroxene. *Acta Geologica Sinica*. 2023. Vol. 97, Iss. 1. pp. 134–148.
- Bussolesi M., Grieco G., Cavallo A., Zaccarini F. Different tectonic evolution of fast cooling ophiolite mantles recorded by olivine–spinel geothermometry: Case studies from Ibalie (Albania) and Nea Roda (Greece). *Minerals*. 2022. Vol. 12, Iss. 1. ID 64.
- Sukhanova K. G., Kuznetsov A. B., Skublov S. G., Galankina O. L. Evaluation of thermal metamorphism temperature of equilibrated ordinary chondrites. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. Vol. 13, Iss. 2s. ID 0618.
- Wan Z., Coogan L. A., Canil D. Experimental calibration of aluminum partitioning between olivine and spinel as a geothermometer. *American Mineralogist*. 2008. Vol. 93, Iss. 7. pp. 1142–1147.
- Putikov O. F., Senchina N. P., Talovina I. V., Duryagina A. M., Telegin Yu. M. et al. Geoelectrochemical detection of PGE content anomalies within the Svetlyi Bor massif (Central Urals). *Russian Geology and Geophysics*. 2017. Vol. 58, No. 7. pp. 815–821.
- Mikhaylova Yu. A., Pakhomovskiy Ya. A., Kalashnikov A. O., Yakovchenuk V. N. Formation of layering of the Lovozero peralkaline intrusion (Kola peninsula, Russia): New data. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*. 2022. No. 19. pp. 222–226.
- Heinonen J. S., Jennings E. S., Riley T. R. Crystallisation temperatures of the most Mg-rich magmas of the Karoo LIP on the basis of Al-in-olivine thermometry. *Chemical Geology*. 2015. Vol. 411. pp. 26–35.
- Foley S. F., Andronikov A. V., Melzer S. Petrology of ultramafic lamprophyres from the Beaver Lake area of Eastern Antarctica and their relation to the breakup of Gondwanaland. *Mineralogy and Petrology*. 2002. Vol. 74, Iss. 2-4. pp. 361–384.
- Glebovitskii V. A., Nikitina L. P., Saltykova A. K., Pushkarev Yu. D., Ovchinnikov N. O. et al. Thermal and chemical heterogeneity of the upper mantle beneath the Baikal–Mongolia Territory. *Petrology*. 2007. Vol. 15, No. 1. pp. 58–89.
- Stepanov S. Yu., Palamarchuk R. S., Khanin D. A., Varlamov D. A., Antonov A. V. The distribution and speciation of PGEs in chromitite from the Svetloborsky, Veresovoborsky, and Kamenushensky Clinopyroxenite–Dunite Massifs (Middle Urals). *Moscow University Geology Bulletin*. 2018. Vol. 73, No. 6. pp. 527–537.
- Saveliev D. E., Makatov D. K., Rakhimov I. R., Gataullin R. A., Shilovskikh V. V. Silicates from Ilherzolites in the south-eastern part of the Kempirsay Massif as the source for giant chromitite deposits (the Southern Urals, Kazakhstan). *Minerals*. 2022. Vol. 12, Iss. 8. ID 1061.
- Yurichev A. N. Accessory spinelides as a tool for reconstruction of thermodynamic parameters of crystallization. *Rudy i metally*. 2014. No. 5. pp. 32–36.
- Chistyakov A. V., Sharkov E. V. Petrology of the Early Paleoproterozoic Burakovsky Complex, Southern Karelia. *Petrology*. 2008. Vol. 16, No. 1. pp. 63–86.
- Yakovleva A. A., Movchan I. B., Medinskaia D. K., Sadykova Z. I. Quantitative interpretations of potential fields: from parametric to geostructural recalculations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2023. Vol. 334, No. 11. pp. 198–215.