

## Исходные магмы Мончегорского комплекса: модельные реконструкции и проблемы интерпретации

Арискин А. А.<sup>1</sup>, Еремин Д. Д.<sup>1,2</sup>, Пшеницын И. В.<sup>2</sup>, Соболев С. Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, ariskin@rambler.ru

<sup>2</sup> Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, eremindd17@gmail.com

**Аннотация.** Для ультрамафитов, вскрытых скважинами М-1 и М-20, при помощи программы КОМАГМАТ-5.3 смоделирована равновесная кристаллизация до близких к солидусным температур. Расчеты проводились при давлении 1 кбар, условиях буфера WM, с шагом 0.1 %. Линии эволюции состава расплавов отвечают последовательности  $Sp + Ol \rightarrow Sp + Ol + Opx \rightarrow Sp + Ol + Opx \pm Pl \pm Cpx \pm$  сульфид. Сравнение этих модельных траекторий показывает, что в случае тела ультрамафитов из скв. М-1 сигнал наиболее высокотемпературных расплавов «записан» в составах нижних плагиогарцбургитов: ~1350 °С, около 15 мас. % MgO в расплаве,  $Sp + Ol$  (~Fo 90.5). Расчеты для пород из скв. М-20 указывают на более кремнекислотную магматическую систему, причем наиболее высокотемпературную магму можно предполагать для Дунитового блока, породы которого кристаллизовались из расплава, содержащего ~19 мас. % MgO в равновесии с оливином Fo 92 при температуре ~1435 °С.

**Ключевые слова:** Мончегорский комплекс, КОМАГМАТ-5, моделирование, температура магмы, оливин.

## Parental magmas of the Monchegorsk Complex: model reconstructions and interpretation problems

Ariskin A. A.<sup>1</sup>, Eremin D. D.<sup>1,2</sup>, Pshenitsyn I. V.<sup>2</sup>, Sobolev S. N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, ariskin@rambler.ru

<sup>2</sup> Vernadsky Institute, Moscow, eremindd17@gmail.com

**Abstract.** Using the COMAGMAT-5.3 program, equilibrium crystallization of ultramafics from boreholes M-1 and M-20 has been modeled. These calculations were carried out at 1 kbar pressure, WM oxygen buffer, and crystallization increment 0.1 %. The modeled liquid lines of descent are consistent with typical crystallization sequence:  $Sp + Ol \rightarrow Sp + Ol + Opx \rightarrow Sp + Ol + Opx \pm Pl \pm Cpx \pm$  sulfide. Comparison of these model trajectories shows that for the M-1 ultramafics a signature of the most high-temperature magmas is recorded in compositions of «lower» plagiogabbros: ~1350 °С, as much as 15 wt. % MgO in the melt,  $Sp + Ol$  (~Fo 90.5). Calculations for the M-20 rocks indicate a more siliceous magmatic system, so that the most high-temperature magma seems to form the Dunite Block, which rocks crystallized from a high-magnesia melt containing of ~19 wt. % MgO in equilibrium with olivine Fo 92 at the temperature ~1435 °С.

**Keywords:** Monchegorsk Complex, COMAGMAT-5, modeling, magma temperature, olivine.

### Введение

Оценки температуры и состава исходных магм для расслоенных комплексов интрузивных пород имеют ключевое значение при разработке моделей кристаллизационной дифференциации и реконструкции физико-химических параметров магматогенного рудообразования, включая природу сульфидного вещества и хромититов. Для решения этих задач около 40 лет назад нами предложен *Метод геохимической термометрии*, который позволяет получить полную информацию о фазовых равновесиях, отвечающих исходному состоянию магматических субстанций или протокумулясных систем, из которых кристаллизовались породы кумулятивного генезиса (Френкель, Арискин, 1987; Арискин, Бармина, 2000). Этот подход успешно апробирован на многих расслоенных интрузивах, включая Скергаард (Гренландия), Киглапайт (о. Лабрадор, Канада), Талнах (СЗ Сибирской платформы), Довыренский и Чинейский плутоны в Южной Сибири (Криволицкая и др., 2001; Арискин, 2002; Бармина, Арискин, 2002; Пшеницын и др., 2024; Ariskin et al., 2018) и ряд менее известных объектов, в том числе сложенных метаморфизованными перидотитами и габброидами (Лю и др., 2019; Анисимов и др., 2025). В данной статье приводятся предварительные результаты геохимиче-

ской термометрии пород Мончегорского интрузивного комплекса в Мурманской области, с целью поиска составов наиболее примитивных и родительских магм, связанных с образованием отдельных блоков или субкамер Мончеплутона и сопутствующих ультрамафитовых тел.

### **Основы методического подхода**

Генетическая интерпретация интрузивных пород базируется на постулате, что они представляют продукты кристаллизации гетерогенных смесей, состоявших из скопившихся кристаллов разных минералов (соответственно составу магмы) и некоторого количества захваченного (интеркумулусного) расплава. При этом структуры полнокристаллических пород указывают на относительно медленное остывание, а составы кумулульных минералов часто демонстрируют незначительные вариации – в пределах первых процентов или даже долей % для краевых минералов. Это предполагает близкие к равновесным соотношения между кристаллами и расплавом – от стадий аккумуляции до субсолидусных процессов. Если допустить, что подобные равновесия отражали состояние протокумулульных смесей, с которых начиналась история *in-situ* кристаллизации кумулатов (за счет порового расплава), то, используя термодинамическое моделирование, можно реконструировать эти первичные характеристики, включая температуру и составы всех исходных фаз. Суть метода состоит в том, чтобы мысленно расплавить породу на 100 % (используя ее валовый состав), а потом равновесно кристаллизовать такой виртуальный расплав по мере понижения температуры, полагая что на расчетной траектории обязательно найдется точка, отвечающая исходному равновесию расплава и аккумулярованных кристаллов.

Сам по себе расчет для произвольного кумулата не дает возможности однозначно оценить температуру и состав искомого расплава – если только не использовать дополнительную информацию (например, вероятный состав наиболее магнезиального оливина). Однако задача решается, если в руках исследователя не один, а группа образцов, которые отобраны в одной локации или из генетически однородного горизонта. Если эти образцы достаточно контрастны по составу, то расчеты нескольких траекторий кристаллизации дадут линии эволюции расплава и минеральных фаз, которые пересекаются в узком интервале температур и диапазоне составов, которые максимально близки параметрам исходной магмы (Арискин, Бармина, 2000). Главная проблема практического применения этих подходов связана с выбором таких образцов, которые в исходном состоянии могли представлять одну и ту же равновесную протокумулульную ассоциацию (гетерогенную взвесь/суспензию), т.е. характеризовались близкими значениями исходной температуры и состава силикатной жидкости. В интрузивной петрологии критерием такого выбора обычно является условие пространственной близости пород – например, в пределах нескольких сантиметров или метров, будь то конкретные горизонты или ритмические пачки расслоенных серий.

Опыт применения геохимической термометрии к интрузивным телам показал, что эти реконструкции должны проводиться в определенной последовательности, которая включает: (1) моделирование равновесной кристаллизации 100 % (т. е. полных) расплавов пород, (2) построение температурно-концентрационных зависимостей для модельных расплавов и (3) поиск области пересечения этих эволюционных линий в Т-Х координатах, которая по определению должна характеризовать вероятную температуру (или некоторый диапазон температур и составов) для искомого первичного равновесия кристаллов и расплава. Последующая работа сводится к анализу результатов расчетов для отдельных образцов, поскольку средняя температура исходной магматической смеси однозначно связана с пропорциями и исходным составом каждого кумулульного минерала (Арискин, Бармина, 2000). Совокупность таких оценок по существу представляет реконструкцию кумулульного строения в пространстве интрузива. Для решения подобных задач в наших работах использовались разные версии программ семейства КОМАГМАТ, включая современные разработки (Арискин и др., 2023). Заметим, однако, что условие применения программы КОМАГМАТ необязательно. В этом подходе допускается использовать любой другой алгоритм моделирования равновесной кристаллизации магматических расплавов, напр. программы MELTS (Ghiorso, Sack, 1995; Gualda et al., 2012), PETROLOG (Danyushevsky, Plechov, 2011) или комплекс PERPLE\_X (Holland et al., 2018).

### Объекты термодинамического моделирования

В Мончегорском плутоне и сопутствующих телах широко распространены дуниты, гарцбургиты, ортопироксениты и оливиновые габбронориты, геохимическое подобие и близкий возраст которых (~ 2.50 млрд. лет) согласуются с мантийной природой и сложной истории интродуирования коры высокомагнезиальными магмами (Расслоенные интрузии..., 2004; Баянова и др., 2010; Чашин и др., 2016; Smolkin et al., 2023). Нами изучены ультрамафиты, отобранные в двух локациях из керна, доступного по результатам геологоразведочного бурения. Основные расчеты проведены для пород, слагающих тело ультрамафитов из структурной скважины М-1 в интервале глубин 2037–2377 м, которые по геохимическим данным близки плагиогарцбургитам северной субкамеры Мончеплутона (Smolkin, Mokrushin, 2022). Эти породы интересны тем, что могут служить аппроксимацией протокумулясных систем, которые формировались из высокомагнезиальных магм, вероятно той же природы, что и исходные магмы для наиболее примитивных пород Мончеплутона (Смолкин и др., 2022). Второй объект – породы из керна скважины М-20, пересекающей хромитоносный горизонт Дунитового блока (или Дунитовой линзы (Богина и др., 2026)) и, вероятно, нижележащие породы расслоенной серии Мончеплутона.

### Условия вычислений

Моделирование траекторий равновесной кристаллизации проводилось для трех типов виртуальных расплавов, характеризующих средние составы отдельных зон в интрузивных телах, средние составы разновидностей пород и в нескольких случаях - валовые составы конкретных образцов. При термометрических расчетах использовалась бета-версия программы КОМАГМАТ-5.3, учитывающая возможность совместной кристаллизации силикатных минералов, Al-Cr шпинели и выделения несмесимой сульфидной жидкости в магматических камерах плагиоклазовой фации глубинности (Арискин и др., 2025). При проведении вычислений постулировались изобарические условия на глубинах около 3 км (P = 1 кбар, по результатам барометрии мончегорских ультрамафитов) (Еремин и др., 2026) и окислительное состояние системы в соответствии с буфером вюстит-магнетит (WM, ~ 10 % окисленного железа в расплаве). Шаг кристаллизации составлял 0.1 %, что обеспечило глубокую кристаллизацию модельных расплавов – обычно до 85–95 % (иногда даже до 97–98 %). Это позволило смоделировать (фактически воспроизвести) составы субсолидусных ассоциаций породобразующих минералов на стадии исчерпания интеркумулясного расплава. Составы исходных расплавов для расчетов даны в табл. 1.

Таблица 1. Составы виртуальных расплавов для мончегорских пород и главных стратиграфических зон

Table 1. Compositions of virtual melts for Monchegorsk rocks and major stratigraphic units

Состав, %	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	S
UC-1	53.8	0.19	3.9	7.8	0.16	29.8	2.8	0.59	0.09	0.04	0.69	0.10	0.020
UC-2	44.3	0.23	4.9	10.1	0.16	34.3	3.5	0.88	0.15	0.03	1.15	0.27	0.020
HARZ-U	42.3	0.17	3.5	10.2	0.15	39.0	2.2	0.53	0.17	0.03	1.38	0.32	0.010
HARZ-L	42.1	0.14	3.0	9.5	0.15	40.8	2.0	0.44	0.13	0.02	1.47	0.33	0.005
LZ	49.2	0.25	6.2	9.8	0.17	27.3	4.8	1.04	0.27	0.03	0.72	0.16	0.025
LC	50.7	0.32	8.0	10.1	0.17	22.3	5.9	1.38	0.46	0.06	0.47	0.12	0.041
DUN	41.2	0.02	0.70	8.5	0.13	49.2	0.5	0.03	0.01	0.00	1.79	0.44	–
HARZ	43.5	0.08	1.7	11.5	0.19	40.1	1.1	0.09	0.05	0.01	1.24	0.35	0.040
OPXN	54.7	0.16	3.2	8.8	0.19	29.0	2.4	0.33	0.26	0.01	0.76	0.12	0.040
DHO	50.5	0.12	2.5	9.7	0.19	33.6	1.8	0.20	0.15	0.01	0.94	0.24	0.043

Примечание. М-1: UC-1 и UC-2 – верхний эндоконтакт, HARZ-U и -L – верхние и нижние плагиогарцбургиты, LZ – зона нижнего эндоконтакта, LC – контактовый меланонорит; М-20: DUN - дуниты, HARZ – гарцбургиты, OPXN – ортопироксениты, DHO – зона переслаивания дунитов, гарцбургитов и ортопироксенитов.

### Температуры и составы наиболее примитивных магм Мончегорского комплекса

На рис. 1 и 2 приведены результаты термометрических расчетов для 6-ти составов, характеризующих ультрамафиты из тела М-1 и 4-х составов, представляющих линзу дунитов и подстилающую зону переслаивания гарцбургитов и ортопироксенитов в керне скв. М-20 (табл. 1). Для обеих локаций расчетный порядок кристаллизации минералов из виртуальных расплавов отвечает последовательности  $Ol \pm Cr-Al\ Spinel$  (обычно от 1600–1800 °С) →  $Orx$  (примерно от 1300 до 1500 °С) →  $Srx \pm Plag$  (~1200 °С). При этом ортопироксен всегда находится в перитектических отношениях с оливином.

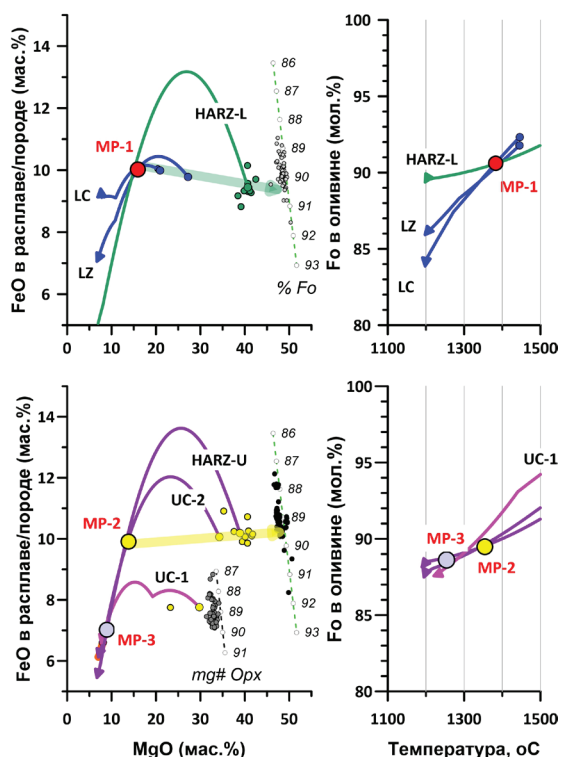


Рис. 1. Эволюция состава модельных расплавов, оливина и температуры для главных типов пород из глубинного тела ультрамафитов, вскрытых скв. М-1.

Обозначения линий отвечают составам в табл. 1, а крупные кружки с индексами МР – составы найденных расплавов в табл. 2. Толстые зеленая и желтая линии – конноды, связывающие эти расчетные расплавы с равновесными составами исходного оливина. Малые цветные кружки – составы «верхних» и «нижних» плагиогарцбургитов; черные кружки – составы  $Ol$  и  $Orx$  по данным микрозондового анализа

Fig. 1. Evolution of the compositions of model melts, olivine and temperature for the major types of rocks from the deep ultramafic body exposed by the borehole M-1.

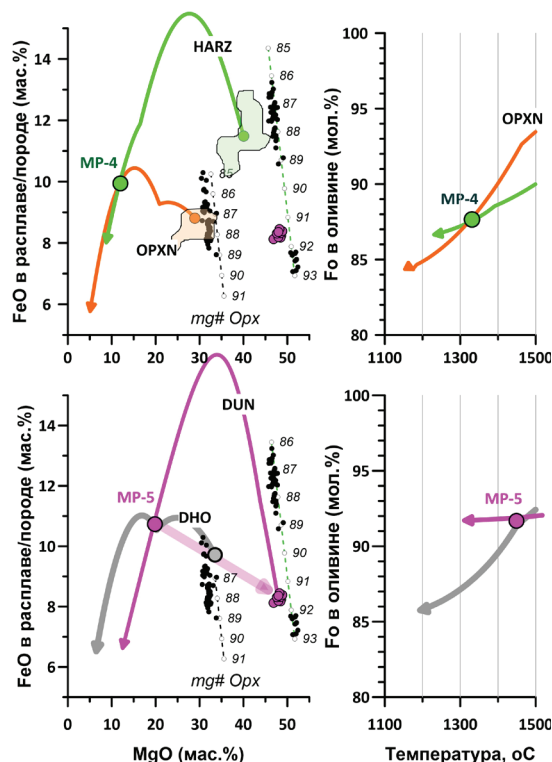
The model lines correspond to compositions in Table 1, whereas large colored circles with MP indices mark estimated primitive melt compositions in Table 2. Thick green and yellow tie-lines connect the calculated melts with equilibrium compositions of the original olivine. Small colored circles are the compositions of «upper» and «lower» plagiogarzburgites; black circles are the compositions of  $Ol$  and  $Orx$  from microprobe studies

Рис. 2. Эволюция состава модельных расплавов, оливина и температуры для главных типов ультрамафитов, вскрытых скв. М-20.

Обозначения линий отвечают составам в табл. 1, а крупные кружки с индексами МР-4 и МР-5 – составы найденных расплавов в табл. 2. Толстая сиреневая линия – коннода, связывающая наиболее примитивный расчетный расплав с равновесным оливином Fo 92. Подкрашенные полигоны – поля составов ортопироксенитов и гарцбургитов из зоны их переслаивания, а меньшего размера сиреневые кружки – составы дунитов. Черные кружки – составы  $Ol$  и  $Orx$  по данным микрозондового анализа

Fig. 2. Evolution of the compositions of model melts, olivine and temperature for the major types of ultramafics exposed by the borehole M-20.

The model lines correspond to compositions in Table 1, whereas large colored circles with MP indices MP-4 and MP-5 mark calculated primitive melt compositions in Table 2. The thick pink tie-line connects the calculated melt with equilibrium olivine Fo 92. Colored polygons represent fields of orthopyroxenite and harzburgites, and smaller pink circles are dunites. Black circles are the compositions of  $Ol$  and  $Orx$  from microprobe studies



Проявления сульфидно-силикатной несмесимости моделируются в широком интервале температур (1590–1200 °С) – в зависимости от степени аккумуляции сульфидов в силикатной матрице. При сравнении модельных порядков кристаллизации расплавов для гарцбургитов из скв. М-1 и М-20 заметны различия в температурах начала кристаллизации Орх: в первом случае 1200–1220 °С, во втором 1389 °С для состава HARZ и 1450 °С для ДНО. Это обусловлено более высокой кремнекислотностью пород из скв. М-20 при близкой и высокой магнезиальности. В соответствии с методом геохимической термометрии (Арискин, Бармина, 2000) точки пересечения линий эволюции состава модельных расплавов, оливина и температуры на рис. 1 и 2 интерпретируются как параметры родоначальных магматических расплавов для выбранных групп пород – МР-1, МР-2, МР-3, МР-4 и МР-5 (рис. 1, 2; табл. 2).

Таблица 2. Параметры исходных расплавов и оливина для ультрамафитов из скважин М-1 и М-20, оцененные по методу геохимической термометрии

Table 2. Parameters of parental melts and original olivine for ultramafics from the boreholes M-1 and M-20, calculated by the Geochemical Thermometry approach

Расплав	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
T (°C)	1381	1349	1232	1324	1435
Fo в оливине	90.5	89.5	88.5	87.5	91.8
SiO <sub>2</sub>	51.2	52.0	55.2	57.6	56.1
TiO <sub>2</sub>	0.45	0.63	0.75	0.53	0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.8	12.6	14.8	10.0	7.14
FeO	9.88	9.69	6.8	10.3	10.0
MnO	0.17	0.15	0.12	0.19	0.18
MgO	15.3	13.0	8.5	12.6	19.3
CaO	7.7	8.5	10.0	6.6	5.5
Na <sub>2</sub> O	1.45	2.3	2.7	0.92	0.64
K <sub>2</sub> O	0.48	0.55	0.68	0.64	0.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.10	0.13	0.06	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.297	0.238	0.130	0.211	0.399
NiO	0.065	0.57	0.029	0.046	0.085

### Выводы

Несмотря на то, что полученные результаты требуют проведения систематических расчетов на более представительной выборке составов пород (возможно с расширением диапазона давлений), можно сделать следующие предварительные выводы:

1) в составах «нижних» плагиогарцбургитов из скв. М-1 «записана» информация о высокомагнезиальной, но не коматиитовой магме, внедрившейся при температуре около 1400 °С. Магматический расплав, как жидкая часть этой магмы, содержал ~15 мас. % MgO при 51 мас. % SiO<sub>2</sub> и находился в равновесии с оливином ~Fo 90.5. Верхняя часть тела ультрамафитов более дифференцирована – вплоть до прикровельных меланоноритов, кристаллизовавшихся из менее магнезиальной субстанции с температурой около 1230 °С (табл. 2);

2) термометрические расчеты для пород из скв. М-20 указывают на более кремнекислотную магматическую систему высокой магнезиальности. Наиболее высокотемпературную магму можно предполагать для Дунитового блока (линзы), породы которого кристаллизовались из расплава, содержащего ~19 мас. % MgO в равновесии с оливином ~Fo 92 при температуре ~1435 °С. Тот факт, что средневзвешенный состав нижележащей зоны переслаивания плагиогарцбургитов и ортопироксенитов (ДНО) попадает на ту же конноду «Расплав (1435 °С) – оливин (Fo 92)» (см. нижнюю пару графиков на рис. 2), можно рассматривать как свидетельство геохимического подобия всех ультрамафитов М-20, вероятно имеющих источником один и тот же магматический резервуар;

3) результаты первых расчетов по моделированию условий кристаллизации пород северной ветви Мончеплутона (НКТ) согласуются с выводом о генетическом родстве с породами из скв. М-20, тогда как в отношении ультрамафитов М-1 можно допустить их связь с породами из основания массива Мончетундры. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

### **Благодарности**

Авторы признательны В. Ф. Смолькину, Н. Ю. Грошеву и Г. С. Николаеву за помощь в организации работ на Мончеплутоне и при опробовании kernового материала.

Исследования поддержаны грантом РФФ 25-27-00475, проведены с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ им. М. В. Ломоносова, и результатов, полученных при выполнении госзаданий ГЕОХИ РАН.

### **Литература**

1. Анисимов Р. Л., Балтыбаев Ш. К., Арискин А. А., Петракова М. Е., Богомолов Е. С. Реконструкция характеристик исходного расплава многофазной клинопироксенит-габбронорит-диоритовой интрузии Кааламо (Северное Приладожье, Южная Карелия) // *Геохимия*. 2025. Т. 70, № 3. С. 2–15.
2. Арискин А. А. Геохимическая термометрия пород расслоенной серии Скергаардского интрузива // *Петрология*. 2002. Т. 10, № 6. С. 563–568.
3. Арискин А. А., Бармина Г. С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм / ред. И. Д. Рябчиков. М. Изд-во: Наука, 2000. 363 с.
4. Арискин А. А., Бычков К. А., Николаев Г. С., Бармина Г. С. Обновленный КОМАГМАТ-5: моделирование эффектов выделения сульфидов при кристаллизации алюмохромистой шпинели // *Петрология*. 2023. Т. 31, № 5. С. 552–569.
5. Арискин А. А., Еремин Д. Д., Бычков Д. А., Сапегина А. В. Методы моделирования высокобарной кристаллизации мафит-ультрамафитовых магм // *Матер. IX Всероссийской конференции с международным участием «Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, петрология, рудный потенциал»*. Екатеринбург. Изд-во: ИГГ УрО РАН: 2025. С. 21–24.
6. Бармина Г. С., Арискин А. А. Оценка химических и фазовых характеристик исходной магмы троктолитового интрузива Киглапейт (Лабрадор, Канада) // *Геохимия*. 2002. Т. 2, № 10. С. 1071–1083.
7. Баянова Т. Б., Нерович Л. И., Митрофанов Ф. П. и др. Мончетундровский базитовый массив Кольского региона: новые геологические и изотопно-возрастные данные // *Доклады АН*. 2010. Т. 431, № 2. С. 216–222.
8. Богина М. М., Чистяков А. В., Шарков Е. В., Ковальчук Е. В. Происхождение дунитовой линзы Мончегорского расслоенного ультрамафит-мафитового плутона (Балтийский щит) на основании минералогических и геохимических данных // *Петрология*. 2026. Т. 34, № 3 (в печати).
9. Еремин Д. Д., Арискин А. А., Соболев С. Н., Пшеницын И. В., Смолькин В. Ф., Япаскерт В. О., Николаев Г. С. Геобарометрия пироксенов из ультрамафитов Мончегорского интрузивного комплекса // *Петрология*. 2026. № 3 (в печати).
10. Криволицкая Н. А., Арискин А. А., Служеникин С. Ф., Туровцев Д. М. Геохимическая термометрия пород Талнахского интрузива: оценка состава расплава и степени раскристаллизованности исходной магмы // *Петрология*. 2001. Т. 9, № 5. С. 451–479.
11. Лю И., Перчук А. Л., Арискин А. А. Высокобарный метаморфизм в перидотитовом кумулате комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал // *Петрология*. 2019. Т. 2, № 2. С. 138–160.
12. Пшеницын И. В., Арискин А. А., Соболев С. Н. Геохимическая термометрия рудоносных габброноритов из апофиза Йоко-Довыренского массива: состав, количество оливина и условия сульфидного насыщения исходной магмы // *Петрология*. 2024. Т. 32, № 1. С. 119–136.
13. Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение / Ред. Ф. П. Митрофанов, В. Ф. Смолькин. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН, 2004. Ч. 1. 177 с.; Ч. 2. 177 с.
14. Смолькин В. Ф., Мокрушин А. В., Баянова Т. Б., Серов П. А., Арискин А. А. Магмоподводящий палеоканал в Мончегорском рудном районе: геохимия, изотопный U-Pb и Sm-Nd анализ Кольский регион, Россия // *Записки Горного института*. 2022. Т. 255. С. 1–14.
15. Чашин В. В., Баянова Т. Б., Серов П. А. Малосульфидные платинометалльные руды палеопротерозойского Мончегорского плутона и массивов его южного обрамления (Кольский полуостров, Россия): Геологическая характеристика и изотопно-геохронологические свидетельства полихронности и рудно-магматических систем // *Геология рудных месторождений*. 2016. Т. 58, № 1. С. 41–63.

16. Френкель М. Я., Арискин А. А., Бармина Г. С. и др. Геохимическая термометрия магматических пород - принципы метода и примеры применения // *Геохимия*. 1987. № 11. С. 1546–1562.
17. Ariskin A. A., Danyushevsky L. V., Nikolaev G. S., Kislov E. V., Fiorentini M. L., McNeill A. W., Kostitsyn Y. A., Goemann K., Feig S. T., Malyshev A. V. The Dovyren Intrusive Complex (Southern Siberia, Russia): Insights into dynamics of an open magma chamber with implications for parental magma origin, composition, and Cu-Ni-PGE fertility // *Lithos*. 2018. V. 302–303. P. 242–262.
18. Danyushevsky L. V., Plechov P. Y. Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2011. V. 12, No 7. P. 1–32.
19. Ghiorso M. S., Sack R. O. Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1995. V. 119, No. 2–3. P. 197–212.
20. Gualda G. A. R., Ghiorso M. S., Lemons R. V., Carley T. L. Rhyolite-MELTS: a modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems // *J. Petrology*, 2012. V. 53, No. 5. P. 875–890.
21. Holland T. J. B., Green E. C. R., Powell R. Melting of Peridotites through to granites: a simple thermodynamic model in the system KNCFMASHTOCr // *J. Petrology*, 2018. V. 59, No 5. P. 881–900.
22. Smol'kin V. F., Mokrushin A. V. Paleoproterozoic layered intrusions of the Monchegorsk ore district: Geochemistry and U-Pb, Sm-Nd, Re-Os isotope analysis // *Minerals*. 2022. V. 12. P. 1432.
23. Smol'kin V. F., Mokrushin A. V., Chistyakov A. V. Layered intrusions of Paleoproterozoic age in the Kola and Karelian regions // *Minerals*. 2023. V. 13. P. 597.