

Минералогическая геобарометрия базальных пород Мончегорского комплекса: от традиционных подходов к моделям с машинным обучением

Еремин Д. Д.^{1,2}, Арискин А. А.^{1,2}, Пшеницын И. В.², Соболев С. Н.²

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, ariskin@rambler.ru

² Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, eremindd17@gmail.com

Аннотация. Приводятся результаты тестирования пироксеновых геобарометров: как традиционных, так и основанных на машинном обучении. Тестирование проводилось на выборке результатов экспериментов в высокомагнезиальных системах при давлениях не выше 10 кбар. Модели, демонстрирующие минимальные погрешности на данной выборке, были применены к мафит-ультрамафитам из трех локаций Мончегорского интрузивного комплекса: (1) ультрамафитовое тело, вскрытое скв. М-1; (2) скв. М-20, пересекающая Дуни-товую линзу и подстилающие ее породы; и (3) отвалы шахты №5 на г. Травяная. Установлено, что породы, вскрытые скв. М-1 и М-20, кристаллизовались на меньших глубинах, чем породы г. Травяная.

Ключевые слова: Мончегорский комплекс, геотермобарометрия, геобарометр, машинное обучение, клинопироксен.

Mineral geobarometry of basal rocks from the Monchegorsk Complex: from traditional approaches to machine learning models

Eremin D. D.^{1,2}, Ariskin A. A.^{1,2}, Pshenitsyn I. V.², Sobolev S. N.²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, ariskin@rambler.ru

² Vernadsky Institute, Moscow, eremindd17@gmail.com

Abstract. We present the results of testing pyroxene and polymineralic geobarometers – both traditional (Nimis, 1995; Putirka, 2008; Wang et al., 2021) and machine learning-based (Petrelli et al., 2020; Higgins et al., 2022; Jorgenson et al., 2022; Chicchi et al., 2023; Agreda-Lopez et al., 2024) on a dataset of experiments in high-magnesian systems at pressures ≤ 10 kbar. Models with the lowest errors on this dataset were applied to mafic–ultramafic rocks from three locations in the Monchegorsk Intrusive Complex: (1) the ultramafic body intersected by borehole M-1; (2) borehole M-20, which crosses the Dunitic Lens and underlying rocks; and (3) waste dumps of Mine No. 5 on Mount Travyanaya. The rocks from boreholes M-1 and M-20 are found to have crystallized at shallower depths than those from Mount Travyanaya.

Keywords: Monchegorsk Complex, geothermobarometry, geobarometer, machine learning, clinopyroxene.

Введение

Оценки давлений и температур кристаллизации магм относятся к важнейшим задачам петрологии, поскольку эти параметры позволяют не только определить глубины процессов дифференциации, но и оценить направленность фракционирования исходных магм, закономерности формирования расслоенных серий, а также факторы рудоносности мафит-ультрамафитовых комплексов (Арискин, Бармина, 2000; Пшеницын и др., 2024; Ariskin et al., 2023). Главным методом оценки *P-T* параметров является минеральная геотермобарометрия. Этот подход, основанный на принципах «фазового соответствия» (Перчук, Рябчиков, 1976), включает расчеты температур и давлений, исходя из составов сосуществующих минералов и постулируя равновесные соотношения между ними. Также существуют мономинеральные геотермометры и геобарометры, основанные на зависимости кристаллохимических характеристик, параметризованных через состав минерала, от давления.

Геотермобарометры калибруются, как правило, на результатах экспериментов по нагреву синтетических и природных смесей в субсолидусных условиях или при наличии равновесного силикатного расплава. Калибровка геотермобарометров обычно сводится к поиску оптимальных коэффициентов в уравнениях заданной формы, продиктованной термодинамическими или кристаллохимическими соображениями, по методу МНК (метод наименьших квадратов) с использованием

различных вычислительных процедур, позволяющих связать параметры состава минералов в продуктах экспериментов с температурой и давлением при проведении опытов.

Вместе с тем, для создания барометрических и термометрических моделей в последние годы пропагандируются методы машинного обучения, где итоговой моделью является не уравнение заданной авторами формы, основанное на законах термодинамики или кристаллохимии, а более сложные алгоритмы вероятностного расчета температуры и давления - нелинейные модели (Petrelli et al., 2020; Higgins et al., 2022; Jorgenson et al., 2022; Chicchi et al., 2023; Agreda-Lopez et al., 2024). Проблема в том, что предложенные модели демонстрируют различную точность расчетов для разных магм. Это определяет необходимость дополнительного тестирования геотермобарометров на экспериментальных данных, желательно максимально близких по составу изученным ассоциациям пород. В данной работе приводятся результаты тестирования мономинеральных клинопироксеновых (далее «Срх-only»; Nimis, 1995; Putirka, 2008; Petrelli et al., 2020; Wang et al., 2021; Higgins et al., 2022; Jorgenson et al., 2022; Chicchi et al., 2023; Agreda-Lopez et al., 2024) и двупироксеновых (далее «Срх-Орх»; Putirka, 2008) геобарометров.

Выбранные по результатам тестирования модели были применены к породам Мончегорского комплекса из трех локаций: (а) тела ультрамафитов из скважины М-1 вблизи контакта массивов Мончеплутона и Мончетундры, (б) керны скважины М-20, пробуренной через Дунитовый блок, и (в) пород из отвалов шахты № 5 на г. Травяная.

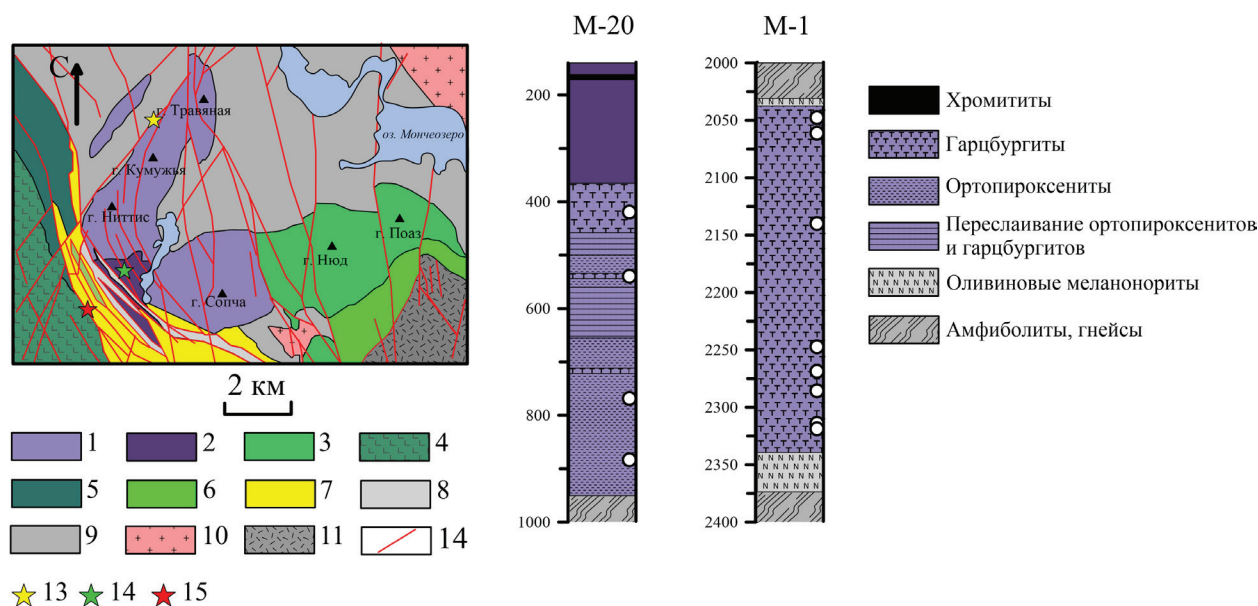


Рис. 1. Схема геологического строения Мончеплутона и точки опробования пород в разрезах скважин М-20 и М-1 по (Smolkin, Mokrushin, 2022) с изменениями (Еремин, Арискин, 2026).

1 – гарцбургиты, ортопироксениты; 2 – дуниты; 3 – (оливиновые) нориты и габбронориты; 4 – габбро, габбронориты; 5 – переслаивающиеся ортопироксениты и нориты; 6 – метагаббронориты, анортозиты; 7 – бластокатаклазиты по габброидам Главного хребта и породам архейского комплекса; 8 – нориты, ортопироксениты, габбро; 9 – амфиболиты, гнейсы; 10 – диориты, гранодиориты; 11 – вулканогенно-осадочные породы Имандра-Варзугской зоны. 12 – тектонические нарушения; 13–15 – положение районов опробования: 13 – шахта № 5 на г. Травяной; 14 – разведочная скважина М-20; 15 – структурная скважина М-1

Fig. 1. Geological map of the Monchepluton (a) and sampling locations in borehole sections M-20 and M-1 (b, c) after (Eremin, Ariskin, 2026).

Fig. 1. Geological map of the Monchepluton and sampling locations in borehole sections M-20 and M-1 after (Smolkin, Mokrushin, 2022), with modifications (Eremin, Ariskin, 2026).

1 – harzburgites, orthopyroxenites; 2 – dunites; 3 – (olivine) norites and gabbronorites; 4 – gabbro, gabbronorites; 5 – interlayered orthopyroxenites and norites; 6 – metagabbronorites, anorthosites; 7 – blastocataclasites after Main Range gabbros and Archean rocks; 8 – norites, orthopyroxenites, gabbro; 9 – amphibolites, gneisses; 10 – diorites, granodiorites; 11 – volcanic-sedimentary rocks of the Imandra-Varzuga zone; 12 – tectonic faults; 13–15 – sampling areas: 13 – Mine No. 5 on Mount Travyanaya; 14 – exploration borehole M-20; 15 – structural borehole M-1

Методы анализа, петрографическое описание и средние химические составы породообразующих минералов (Ol, Pl, Crx, Орх, Sp) для 18 изученных пород (г. Травяная – 6, скв. М-20 – 4 и скв. М-1 – 8) приведены в (Еремин и др., 2026; Еремин, Арискин, 2026). Образцы с г. Травяной представляют плагиогаецбургиты (3 шт.), ортопироксениты (2 шт.) и меланонорит. Ультрамафиты из скв. М-1 (рис. 1 в) – плагиогаецбургиты (8 шт.). Из керна скв. М-20 (рис. 1 б) выбраны породы, подстилающие Дунитовый блок: ортопироксениты и плагиогаецбургиты (по 2 шт.).

Геобарометрические модели

Подход (Nimis, 1995) заключается в расчете давления как функции объемов элементарной ячейки и позиции M1 в клинопироксене. Объемы параметризованы через состав Crx. Температуру данная модель не учитывает. Уравнение откалибровано на данных экспериментов при давлениях от 2 до 24 кбар в интервале температур 1126–1400 °С, а составы «сухих» систем варьировали от низкокальциевых MORB до щелочных базальтов.

Геобарометры (Putirka, 2008; Wang, 2021) продолжают этот подход. Уравнение 32a (Putirka, 2008) имеет два принципиальных отличия от уравнения (Nimis, 1995): 1) учет температуры в виде линейного и логарифмического членов; 2) гораздо более широкий диапазон P - T условий (P от 1 атм до 75 кбар и T от 800 до 2000 °С) и состава расплава в экспериментах, вошедших в калибровочную выборку. На той же выборке откалиброван «Crx-only» геотермометр (уравнение 32d). В работе также приводятся дупироксеновые «Crx-Орх» геотермобарометры (уравнения 36–39). Барометрические уравнения 38 и 39 различаются наличием в последнем температурного члена. Геотермометр 36 откалиброван для полной выборки из 487 пар Crx-Орх, а 37 – для тех 390 экспериментов, где $Mg\#(Crx) > 0.75$. На основании предварительного тестирования нами выбраны для рассмотрения геобарометр 39 и геотермометр 37.

Для калибровки «Crx-only» геотермобарометра (Wang et al., 2021) использовалась выборка из 508 экспериментов, проведенных в сухих и водосодержащих системах основного и среднего состава при P 1–12 кбар и $T > 800$ °С. Главное отличие уравнения (Wang et al., 2021) от предшествующих – его нелинейность, причем в авторском excel-листе есть несоответствие с опубликованным в статье уравнением. Какая из версий правильная – неясно.

Термобарометрические модели (Petrelli et al., 2020; Higgins et al., 2022; Jorgenson et al., 2022; Agreda-Lopez et al., 2024) основаны на алгоритме неглубокого машинного обучения ExtraTrees (Еремин, Арискин, 2026; Geurts et al., 2001). Все эти модели обучены на огромных массивах данных в широком диапазоне P - T условий (615 – 1209 экспериментов), с минимальными ограничениями по составу расплава в изученных системах. Ни из одного обучающего массива, кроме (Higgins et al., 2022), не были исключены эксперименты при 1 атм, несмотря на проблему потери Na в таких экспериментах (Putirka, 2008). Во всех обучающих выборках присутствуют эксперименты как в сухих, так и в водосодержащих системах. Температура и давление по этим моделям рассчитываются независимо друг от друга.

Модель (Chicchi et al., 2023) основана на глубоком машинном обучении (Еремин, Арискин, 2026; Goodfellow et al., 2016). Состоит она из двух отдельных нейросетей: одна – геобарометр, вторая – геотермометр. Хотя эти P и T рассчитываются независимо друг от друга, глубокое машинное обучение позволяет выявлять статистические связи между параметрами состава Crx, т. е. в неявном виде учитывать температуру в барометрической модели и давление в термометрической. В выборку для обучения моделей вошли 5599 составов Crx, предположительно равновесных с расплавом. Содержание SiO₂ варьируют в этих расплавах от 35 до 78 мас. % при магнезиальности $2.5 < Mg\# < 84.3$. Давление в опытах не превышало 10 кбар при температурах от 650 до 1500 °С. Состав Crx ограничен концентрациями ферросилита (5–50 мас. %) и волластонита (20–55 мас. %). Из выборки исключены эксперименты с «нестехиометричным» пироксеном, и данные опытов, в которых сумма оксидов в Crx была ниже 97.5 мас. % или выше 102.5 мас. %.

Тестовая выборка экспериментальных данных

В нашей работе использована тестовая выборка экспериментальных данных (далее ТВЭД (Еремин и др., 2026)), которая включает результаты субликвидусных (в присутствии расплава) и субсолидусных опытов при давлениях $1 \text{ бар} < P \leq 10,5 \text{ кбар}$. Эта выборка была сформирована на основе актуальной версии базы данных ИНФОРЭКС (Ariskin, Varmina, 2004; Арискин и др., 2023) с привлечением информации из базы данных MELT А. В. Гирниса (ИГЕМ РАН). Второе ограничение этой выборки – высокомагнезиальный состав расплавов/стекол ($\text{Mg\#} > 63$), что гарантирует высокую магнезиальность оливина ($\text{Fo} > 85 \%$) и пироксенов. Состав стекол ограничен от пикробазальтов до андезибазальтов (44–55 мас. % SiO_2), при $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 5 \text{ мас. \%}$. Дополнительные ограничения: продолжительность экспериментов не менее 24 часов, f_{O_2} ниже QFM+1. Исключены опыты с обогащением шихты оксидами редких элементов. Чтобы приблизить тестовую выборку к условиям близосолидусных равновесий (аппроксимирующих природные парагенезисы), в этом массиве оставлены только результаты опытов при $T \leq 1300^\circ\text{C}$. В результирующую ТВЭД вошли данные экспериментов (64 субликвидусных и 31 субсолидусного), отвечающих условиям формирования мафит-ультрамафитовых интрузивов, затвердевающих в условиях плагиоклазовой фации, очевидным представителем которых является Мончеплутон.

Результаты тестирования геобарометров

Тестирование показало (табл. 1; рис. 2, 3), что среди традиционных моделей тестовую выборку наилучшим образом воспроизводят не учитывающее температуру уравнение (Nimis, 1995) и оба температурно-зависимых уравнения (Putirka, 2008). В тестовых расчетах использовались экспериментальные температуры. Уравнение, опубликованное в статье (Wang et al., 2021), воспроизводит данные с большей погрешностью (1σ) и с систематическим занижением оценок давлений для субликвидусных экспериментов (рис. 2). Тем не менее, данные субсолидусных экспериментов модель воспроизвела без систематических завышений или занижений.

Барометры, основанные на алгоритме ExtraTrees (рис. 3) склонны к завышению оценок давлений для субсолидусной подвыборки. Из них максимальные превышения демонстрирует геобарометр (Agreda-Lopez et al., 2024), в среднем на ~4 кбар. Остальные модели завышают давления примерно на 2 кбар. С данными большинства субликвидусных экспериментов эти барометрические модели справляются лучше. Барометр (Higgins et al., 2022) воспроизвел субликвидусную подвыборку с точностью до 1 кбар. Модель (Agreda-Lopez et al., 2024) завышает давления для обоих типов экспериментов. Использование глубокого машинного обучения (Chicchi et al., 2023) повысило точность барометрии – для субсолидусных условий экспериментальные значения воспроизвелись с погрешностью $\pm 1.6 \text{ кбар}$ (1σ), для субликвидусных погрешность оценки составила $\pm 1.0 \text{ кбар}$ (табл. 1).

На основании тестирования мы выбрали барометры (Nimis, 1995; Putirka, 2008; Petrelli et al., 2020; Wang et al., 2021; Higgins et al., 2022; Chicchi et al., 2023) для применения к мончегорским ультрамафитам. Сравним полученные по ним оценки.

Барометрия пород Мончегорского комплекса

Исследования состава породообразующих минералов включали три типа анализов Сrx: (1) точечные анализы однородной каймы; (2) точечные анализы между ламеллями ортопироксена в участках субсолидусного распада и (3) усредненные по площади анализы подобных участков (Еремин и др., 2026). Анализы второго типа в расчетах не использовались (Еремин, Арискин, 2026). Первый тип использовался в расчетах для ультрамафитов скважин М-1 и М-20, третий – для пород из шахты № 5 (г. Травяная). Главный результат проведенных расчетов состоит в том, что для трех изученных локаций Мончегорского комплекса большинство геобарометров предсказывают давления ниже 3.5 кбар.

При этом, независимо от оценок или принятых значений температур, перидотиты из шахты № 5 на горе Травяная несут признаки более глубинных условий, чем породы из скв. М-1 и М-20. Абсолютные оценки давления варьируют, но их разница (за исключением нескольких случаев) выдер-

Таблица 1. Средние составы Срх и оценки *P-T* параметров для трех локаций Мончегорского комплекса
 Table 1. Average Сrх compositions and *P-T* estimates for three localities of the Monchegorsk Complex

	М-1	М-20	Травяная
SiO ₂	53.02 ± 0.37	52.93 ± 0.35	52.24 ± 0.54
TiO ₂	0.60 ± 0.12	0.37 ± 0.06	0.39 ± 0.30
Al ₂ O ₃	2.25 ± 0.22	2.33 ± 0.36	3.50 ± 0.47
FeO	3.24 ± 0.25	3.87 ± 0.28	4.91 ± 0.57
MnO	0.11 ± 0.06	0.11 ± 0.02	0.14 ± 0.03
MgO	17.09 ± 0.24	17.06 ± 0.26	18.16 ± 0.87
CaO	22.36 ± 0.35	22.02 ± 0.29	19.10 ± 1.19
Na ₂ O	0.44 ± 0.03	0.35 ± 0.03	0.45 ± 0.11
Cr ₂ O ₃	0.88 ± 0.11	0.96 ± 0.16	1.11 ± 0.17
Оценки по традиционным моделям			
<i>P</i> , кбар (Nimis, 1995)	1.2 ± 0.5	1.0 ± 0.4	3.9 ± 1.0
<i>P</i> , кбар (Putirka-1)	1.4 ± 1.1	1.8 ± 0.6	7.9 ± 1.5
<i>T</i> , °C (Putirka-1)	1171 ± 14	1183 ± 7	1246 ± 25
<i>P</i> , кбар (Putirka-2)	2.7 ± 1.0	3.3 ± 0.6	4.8 ± 1.7
<i>T</i> , °C (Putirka-2)	927 ± 18	951 ± 18	1065 ± 54
<i>P</i> , кбар (Putirka-3)	3.5 ± 0.7	2.7 ± 0.7	4.2 ± 0.9
<i>T</i> , °C (Putirka-3)	929 ± 16	949 ± 14	1058 ± 52
<i>P</i> , кбар (Wang et al., 2021)	0.6 ± 1.4	0.8 ± 0.6	3.9 ± 1.4
Оценки по моделям с машинным обучением			
<i>P</i> , кбар (Petrelli et al., 2020)	1.9 ± 0.3	1.5 ± 0.5	5.7 ± 2.2
<i>P</i> , кбар (Higgins et al., 2022)	2.6 ± 0.3	3.2 ± 0.4	8.6 ± 1.7
<i>P</i> , кбар (Chicchi et al., 2023)	6.2 ± 1.0	4.5 ± 0.5	6.4 ± 1.7

Примечание. Расчеты по геобарометрам (Putirka, 2008) проводились в трех вариантах: Putirka-1 и Putirka-3 по ур-ю (2), Putirka-2 – по ур-ю (6). При итерационных «включениях» геотермометров в первом случае использовалось ур-е 32d («Срх-only»), во втором и третьем – ур-е 37 («Срх-Орх»).

живается на уровне 1–1.5 кбар, что эквивалентно разнице по глубине примерно на 3–4.5 км. Очевидно, что такие различия обусловлены более глиноземистым составом пироксенов из пород, вскрытых шахтой № 5, по сравнению с пироксенами из керна изученных скважин. Этот результат представляется важным с геологической точки зрения и должен учитываться при разработке сценариев формирования отдельных блоков в реконструкциях сводного разреза Мончеплутона.

Другой важный вывод состоит в том, что температурно-зависимые барометры дают противоречивые результаты. Это выражается в том, что разным температурам могут отвечать одинаковые значения давлений (см. рис. 10 в (Еремин и др., 2026)). По этой причине мы не рекомендуем применять температурно-зависимые пироксеновые геобарометры к перидотитам плагиоклазовой фации.

Таким образом, наиболее надежными оценками представляются результаты расчетов по (Nimis, 1995; Wang et al., 2021). Среди моделей с машинным обучением близкие, но завышенные примерно на 1-1.5 кбар оценки дает модель (Petrelli et al., 2020). Другие модели приводят к более высоким значениям давлений.

Модели с машинным обучением, очевидно, еще не вышли на уровень, необходимый для систематического и повсеместного применения, по крайней мере к продуктам кристаллизации мафит-ультрамафитовых магм.

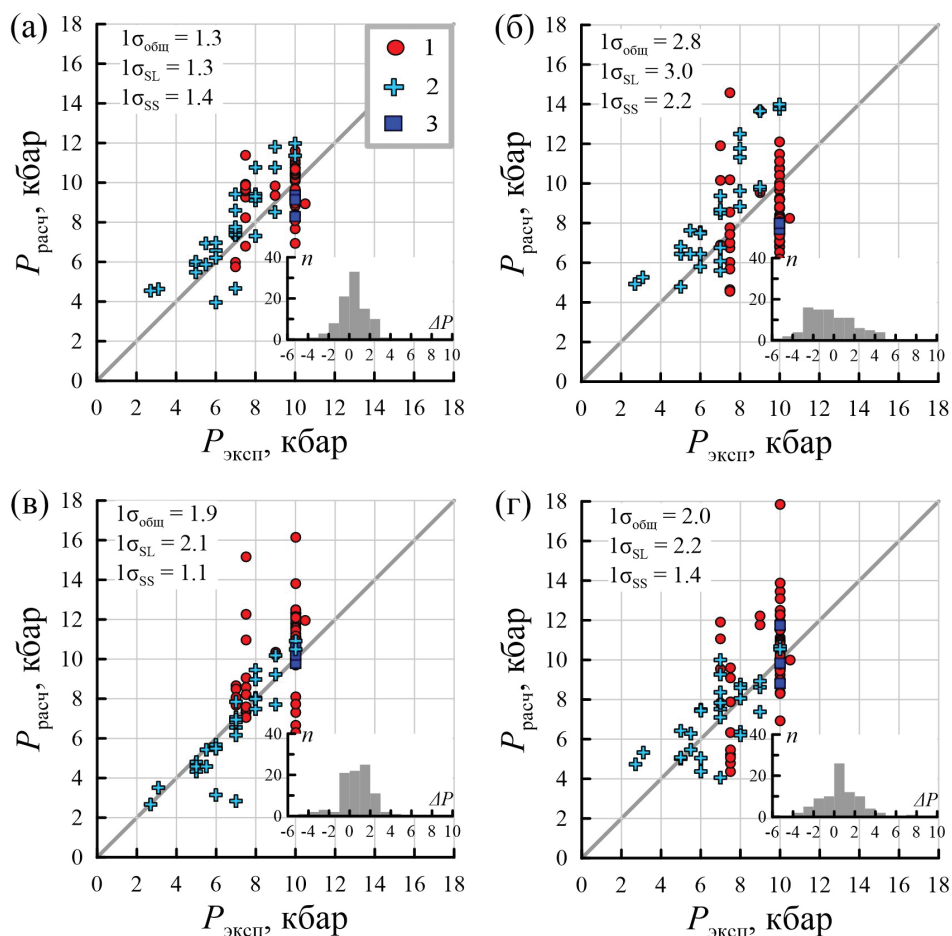


Рис. 2. Результаты тестирования пироксеновых геобарометров: а) Nimis, 1995; б) Wang et al., 2021; в) Putirka, 2008 (ур-е 32а, «Срх-only»); г) Putirka, 2008 (ур-е 37, «Срх-Орх»).

Эксперименты: 1 – субликвидусные, 2 и 3 – субсолидусные: 2 – при 1000–1150 °С, 3 – при 1245–1250 °С. Исходные данные описаны в (Еремин и др., 2026); $\Delta P = P_{\text{расч}} - P_{\text{эксп}}$; на гистограммах показано распределение значений ΔP для всей ТВЭД

Fig. 2. Results of testing pyroxene geobarometers: (a) Nimis, 1995; (b) Wang et al., 2021; (c) Putirka, 2008 (Eq. 32a, «Срх-only»); (d) Putirka, 2008 (Eq. 37, «Срх-Орх»).

Experiments: 1 – subliquidus; 2 and 3 – subsolidus: 2 – at 1000–1150 °C, 3 – at 1245–1250 °C. Source data are described in (Eremin et al., 2026); $\Delta P = P_{\text{calc}} - P_{\text{exp}}$

Выводы

На основании тестирования ряда популярных геобарометрических моделей к плагиоклаз-содержащим ультрамафитам рекомендуем применять клинопироксеновый «Срх-only» геобарометр (Nimis, 1995). Барометры с машинным обучением и температурно-зависимые модели использовать не рекомендуем.

Откалибровать стабильно работающий, достаточно точный ($1\sigma < 1-2$ кбар) и универсальный «Срх-only» геобарометр не представляется возможным, т. к. клинопироксен одного и того же состава можно получить из разных расплавов при разных давлениях. Несмотря на нелинейность моделей с машинным обучением, некоторые важные переменные (T , f_{O_2} , состав расплава) в этих процедурах остаются «скрытыми».

В качестве наиболее реалистичных оценок давления для пород Мончегорского интрузивного комплекса мы рекомендуем результаты расчетов по геобарометру (Nimis, 1995): 1.0 ± 0.5 кбар для скв. М-1 и М-20 и для перидотитов г. Травяной – 3.9 ± 1 кбар.

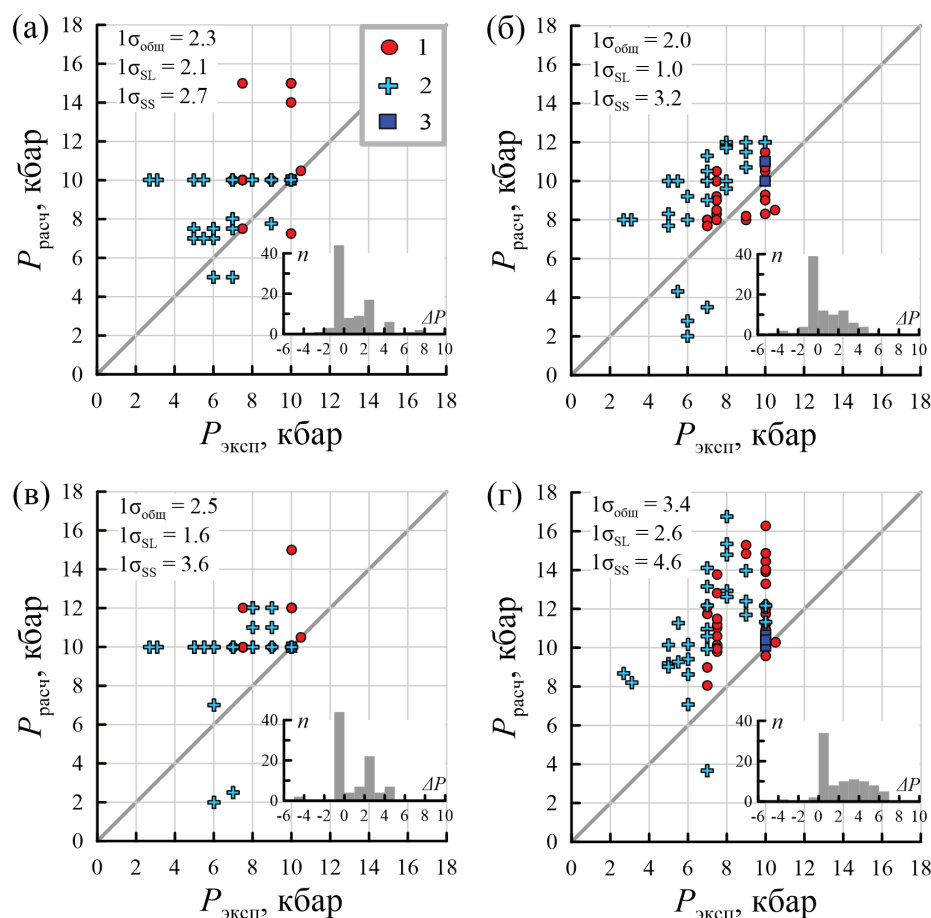


Рис. 3. Результаты тестирования пироксеновых геобарометров с машинным обучением: а) Petrelli et al., 2020; б) Higgins et al., 2022; в) Jorgenson et al., 2022; г) Agreda-Lopez et al., 2024. 1–3 – см. пояснение к рис. 2

Fig. 3. Results of testing machine learning pyroxene geobarometers: (a) Petrelli et al., 2020; (b) Higgins et al., 2022; (c) Jorgenson et al., 2022; (d) Agreda-Lopez et al., 2024. 1–3 – see caption to Fig. 2

Литература

1. Арискин А. А., Бармина Г. С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм / Ред. И. Д. Рябчиков. М. Изд-во: Наука, 2000. 363 с.
2. 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. <https://doi.org/10.31857/S0869590323050023>.
3. 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 (принято в печать).
4. Еремин Д. Д., Арискин А. А., Соболев С. Н., Пшеницын И. В., Смолькин В. Ф., Япаскурт В. О., Коротаева Н. Н., Николаев Г. С. Геобарометрия пироксенов из ультрамафитов Мончегорского интрузивного комплекса // Петрология. 2026. Т. 34, № 3 (принято в печать).
5. Еремин Д. Д., Арискин А. А. Геобарометрия пироксенов из ультрамафитов Мончегорского интрузивного комплекса: II. Модели с машинным обучением // Петрология. 2026. Т. 34, № 6 (принято в печать).
6. Перчук Л. Л., Рябчиков И. Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. / Ред. А. М. Антокольская. М. Изд-во: Недра, 1976. 286 с.
7. 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. Т. 32, № 1. С. 119–136. <https://doi.org/10.31857/S0869590324010071>.
8. Ariskin A. A., Barmina G. S., Koptev-Dvornikov E. V., Bychkov K. A., Nikolaev G. S. Intrusive COMAGMAT: from simple magma differentiation models to complex algorithms simulating the structure of layered intrusions // Advances in Geochemistry, Analytical Chemistry, and Planetary Sciences / Eds. V. P. Kolotov, N. S. Bezaeva. Springer International Publishing. New York. 2023. P. 101–119. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09883-3_3.

9. Chicchi L., Bindi L., Fanelli D., Tommasini S. Frontiers of thermobarometry: GAIA, a novel Deep Learning-based tool for volcano plumbing systems // *Earth and Planetary Science Letters*. 2023. V. 620. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118352>.
10. Geurts P., Ernst D., Wehenkel L. Extremely randomized trees // *Machine Learning*. 2006. V. 63, No. 1. P. 3–42. <https://doi.org/10.1007/s10994-006-6226-1>.
11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press. 2016. 800 p.
12. Higgins O., Sheldrake T., Caricchi L. Machine learning thermobarometry and chemometry using amphibole and clinopyroxene: a window into the roots of an arc volcano (Mount Liamuiga, Saint Kitts) // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2022. V. 177, No 10. <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01874-6>.
13. Jorgenson C., Higgins O., Petrelli M., Bégué F., Caricchi L. A machine learning based approach to clinopyroxene thermobarometry: model optimisation and distribution for use in Earth Sciences // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2022. V. 127. <https://doi.org/10.1029/2021JB022904>.
14. Nimis P. A clinopyroxene geobarometer for basaltic systems based on crystal-structure modeling // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1995. V. 135. P. 115–121. <https://doi.org/10.1007/s004100050093>.
15. Petrelli M., Caricchi L., Perugini D. Machine learning thermobarometry: Application to clinopyroxene-bearing magmas // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2020. V. 125. <https://doi.org/10.1029/2020JB020130>.
16. Putirka K. D. Thermometers and barometers for volcanic systems // *Rev. Mineral. Geochem.* 2008. V. 69, No 1. P. 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>.
17. 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. 1432 p. <https://doi.org/10.3390/min12111432>.
18. Wang X., Hou T., Wang M. et al. A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems // *Europ. J. Mineral.* 2021. V. 33, No 5. P. 621–637. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-621-2021>.