

Условия образования магматических пород Хохольско-Репьёвского батолита Волго-Донского орогена: проверка моделей фракционной кристаллизации и ассимиляции

Петракова М.Е.¹, Анисимов Р.Л.¹, Балтыбаев Ш.К.^{1,2}

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, maribya@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Палеопротерозойский Хохольско-Репьёвский батолит расположен в пределах Донского террейна Волго-Донского орогена. Батолит сложен двумя типами пород – потуданским и павловским. Породы потуданского типа дифференцированы от кварцевого монзогаббро до гранодиоритов, павловского – от габбродиоритов до лейкогранитов. Породы обоих типов сходны по минеральному составу и P-T параметрам образования, но отличаются по ряду геохимических признаков. С помощью термодинамического моделирования в программе Magma Chamber Simulator (MCS) была произведена проверка влияния на минералообразование в породах потуданского и павловского типов водонасыщенности расплава и ассимиляции вмещающих пород с целью определения возможности их происхождения из одного общего или разных материнских расплавов. В ходе моделирования магматической кристаллизации было установлено, что для пород потуданского типа будет характерен субщелочной тренд эволюции остаточных расплавов, а для пород павловского – переходный от известково-щелочного к субщелочному. Полученные тренды совпадают с реальными трендами распределения фигуративных точек составов дифференцированных серий пород двух типов. Оценено минимальное содержание воды в магме потуданского типа – 2 вес. %, в магме павловского типа – 4 вес. %, при котором адекватно воспроизводится качественный и количественный минеральный состав наблюдаемых пород. Контаминация расплава архейскими тоналит-трондьемит-гранодиоритовыми гнейсами в верхнекоровых условиях не влияет на составы потуданской и павловской магм из-за незначительного объема плавления боковых пород. По результатам моделирования, нельзя получить породы потуданского и павловского типа из общего материнского расплава, что говорит о разном происхождении магм двух типов пород.

Ключевые слова: палеопротерозой, Волго-Донской ороген, фракционная кристаллизация, моделирование, MELTS, MCS.

Conditions for the formation of igneous rocks of the Khokhol-Repyevka batholith of the Volga-Don orogen: verification of fractional crystallization and assimilation models

Petrakova M.E.¹, Anisimov R.L.¹, Baltybaev S.K.^{1,2}

¹ Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint-Petersburg, maribya@mail.ru

² Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg

Abstract. The Palaeoproterozoic Khokhol-Repyevka batholith is located within the Don terrain of the Volga-Don orogen. The batholith is composed of two types of rocks - Potudan and Pavlovsk. The rocks of the Potudan type are differentiated from quartz monzogabbro to granodiorites, while the rocks of the Pavlovsk type are differentiated from gabbrodiiorites to leucogranites. The rocks of both types are similar in mineral composition and P-T parameters of formation, but vary in a number of geochemical features. The thermodynamic modeling in the Magma Chamber Simulator (MCS) program was used to test the effect of water saturation and the assimilation of host rocks on mineral formation in the rocks of the Potudan and Pavlovsk types in order to determine the possibility of their origin from one or more parent melts. It was found that the rocks of the Potudan type would be characterized by a subalkaline trend of the evolution of residual melts while the rocks of the Pavlovsk type have a transitional trend from calc-alkaline to subalkaline. The obtained trends coincide with the real trends established by the distribution of figurative points of the compositions of two type rocks. The minimum water content is estimated at 2 wt. % in the Potudan type magma and 4 wt. % in the Pavlovsk type. These values of water contents adequately reproduce the qualitative and quantitative mineral composition of the observed rocks. Contamination of the melt with Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite gneisses in the upper crustal conditions does not affect the compositions of the Potudan and Pavlovsk magmas due to the insignificant amount of melting of wall rocks. Modeling results indicate that it is impossible to obtain rocks of the Potudan and Pavlovsk types from a single parental melt, which suggests different magma origins of the two rock rocks.

Keywords: Palaeoproterozoic, Volga-Don orogen, fractional crystallization, modeling, MELTS, MCS.

Введение

Палеопротерозойский Хохольско-Репьевский батолит (ХРБ) Донского террейна сформировался в постколлизийный этап развития Волго-Донского орогена (Terentiev et al., 2020; Петракова и др., 2022). Он сложен магматическими породами двух типов – павловского и потуданского, которые образовались 2050–2080 млн. лет назад (Terentiev et al., 2020; Петракова и др., 2020; 2022).

Породы обоих типов имеют сходный порядок кристаллизации минералов, близкие составы породообразующих минералов. Их также объединяет близость P-T параметров формирования на глубине около 9 км при температурах $1000 \pm 100^\circ\text{C}$ (Петракова, Терентьев, 2018). Но при этом эти породы отличаются рядом геохимических параметров, что, возможно, является следствием определенной специфики их кристаллизации. Цель данной работы заключается в проверке влияния на магматическое минералообразование таких факторов, как водонасыщенность магм, ассимиляция боковых пород, которые, возможно, объяснили бы геохимические особенности сравниваемых типов пород. Для проверки моделей кристаллизации пород применяется инструмент термодинамического моделирования.

Краткая геологическая характеристика и минералого-геохимические особенности пород

ХРБ входит в так называемый павловский гранитоидный комплекс наряду с другим крупным батолитом региона – Павловским, расположенным южнее. К этому комплексу также относят серию разобленных массивов в центральной части Донского террейна и Курском блоке (рис. 1). Породы комплекса дифференцированы от габброидиоритов до лейкогранитов.

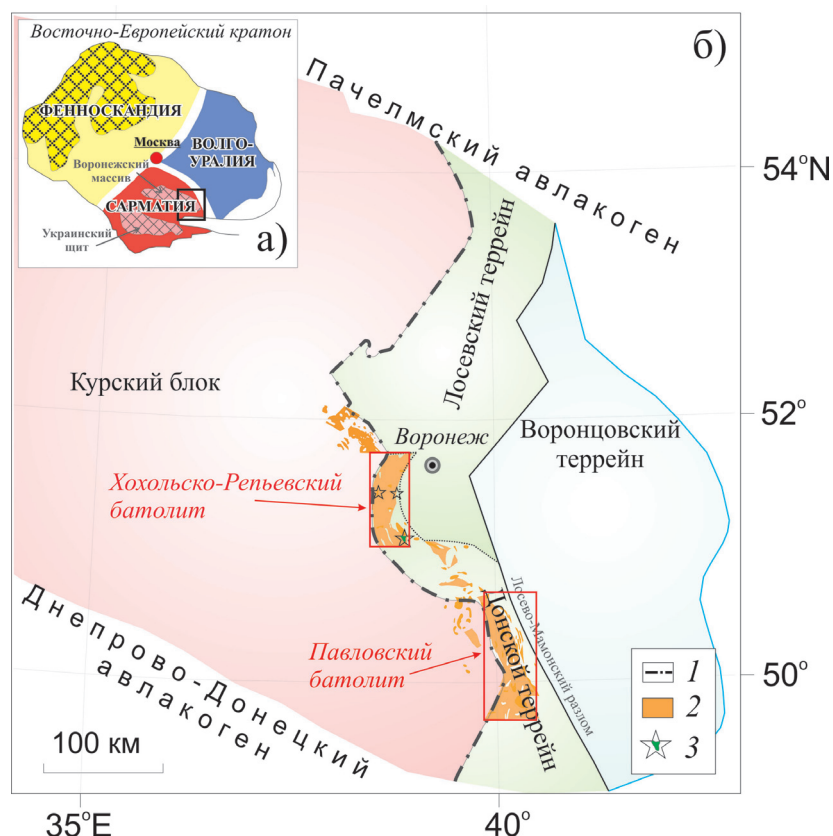


Рис. 1. а – положение Волго-Донского орогена в пределах Восточно-Европейского кратона; б) положение крупнейших батолитов в Донском террейне: 1 – западная граница Волго-Донского орогена; 2 – породы павловского типа; 3 – породы потуданского типа.

Fig. 1. a – location scheme of the Volga-Don orogen within the East European craton. b – locations of the biggest batholites in the Don terrain: 1 – western boundary of the Volga-Don orogen; 2 – rocks of the Pavlovsk type; 3 – rocks of the Potudan type.

Гранитоиды павловского комплекса вмещают дифференцированные от кварцевого монцогаббро до гранодиорита породы потуданского типа, которые слагают штокообразные тела площадью до 15 км².

Главные породообразующие минералы – Срх (много в потуданских, реликты в павловских), Hbl, Pl(An₅₀₋₂₀), Kfs, Qz (здесь и далее аббревиатуры минералов приведены по (Whitney, Evans, 2010)). Обилие Fe-Ti оксидов в потуданских породах отражается в высоком содержании FeO_{tot} (6.1–13.9 вес. %), TiO₂ (0.5–2.3 вес. %), MgO (1.5–6.1 вес. %), и характеризует их как железистые, в отличие от павловских – более магнезиальных с FeO_{tot} (1.8–8.7 вес. %) и MgO (0.5–3.5 вес. %), TiO₂ (0.3–1.4 вес. %). Содержание щелочей в обоих типах пород высокое (K₂O+Na₂O = 5–11 вес. %), но потуданские породы относятся к субщелочной серии, а павловские – преимущественно к известково-щелочной. Все породы являются метаглиноземистыми, индекс A/CNK (Al/Ca+Na+K) < 1. Спектры распределения РЗЭ сильно фракционированные (La_N/Sm_N = 1.9–10.4) и (Gd_N/Yb_N = 2.6–11.2), европиевые аномалии (Eu/Eu* = 0,64–1,14) либо отрицательные, либо их нет. Отмечается сильное обогащение Cs, Ba, U, Th и обеднение Ti, Nb, Sr.

Методика моделирования и подбор начальных параметров

Термодинамическое моделирование выполнено с применением программы MCS (Bohrson et al., 2014), которая позволяет изучить процессы FC (фракционная кристаллизация) и AFC (ассимиляция и фракционная кристаллизация) в многокомпонентно-многофазной системе на основе программ «семейства» MELTS (Ghiorso, Sack, 1995; Asimow, Ghiorso, 1998). Применяемый принцип моделирования минералообразования – минимизация свободной энергии Гиббса системы. Расчеты выявляют порядок кристаллизации минералов из расплава, их пропорции и составы при заданном давлении и кислородном буфере. Для исследования выбрана версия rhyolite-MELTS 1.1.0, оптимизированная для высококремнистых составов с присутствием кварца, двух полевых шпатов и H₂O.

Для моделирования процесса FC подбирались параметры, близкие к рассчитанным по минеральным геотермобарометрам. Давление в магматической камере по геобарометру «Al-in-Hbl» оценено в 3 кбар (Петракова, Терентьев, 2018). Кристаллизация минералов начинается с температуры ликвидуса, которая рассчитывается автоматически для каждого заданного состава. Моделирование проводится до 850°C, чтобы избежать неопределенностей, связанных с появлением водосодержащих минералов, для которых термодинамические свойства пока слабо изучены.

По ильменит-магнетитовому фугометру (Anderson, Lindsley, 1985) и по составам амфиболов (Anderson, Smith, 1995; Ridolfi, Renzulli, 2010) фугитивность кислорода определена на уровне буфера QFM.

Водонасыщенность магм по составам амфиболов (Ridolfi, Renzulli, 2010) и оценена для потуданской магмы 3–4 вес. %, а павловской – 4.5–6 вес. % Содержание воды также оценивалось подбором её до достижения совпадения природных и расчетных данных. Для этого были протестированы варианты с содержанием H₂O в магме от 0.5 до 4 вес. %.

Результаты моделирования процессов FC и AFC

Тестировались составы начальных дифференциатов пород потуданского и павловского типов (табл. 1), т.е. образцы с минимальным содержанием кремнезема и наибольшим – MgO. Учитывая то, что породы батолита граничат с архейскими образованиями Курского блока, в качестве возможного контаминанта при AFC был взят состав ТТГ архейского гнейса – образец 7538 из работы (Щипанский и др., 2007).

Для состава образца 8003/255 потуданского типа при давлении 3 кбар, QFM буфере и содержании воды до 1 вес. %, расплав эволюционирует до гранодиоритового состава (SiO₂ = 64 вес. %) в поле субщелочного тренда. Ликвидусные температуры высокие – от 1229°C (рис. 2).

При относительно сухих условиях (до 1 вес. % H₂O в магме) для выбранного состава моделируются парагенезисы с Орх в диапазоне температур 1020–900°C (табл. 2, рис. 3). Однако отсутствие Орх в наших реальных образцах говорит о том, что «сухие» магмы не подходят для объяснения кристаллизации потуданских кварцевых монцогаббродиоритов.

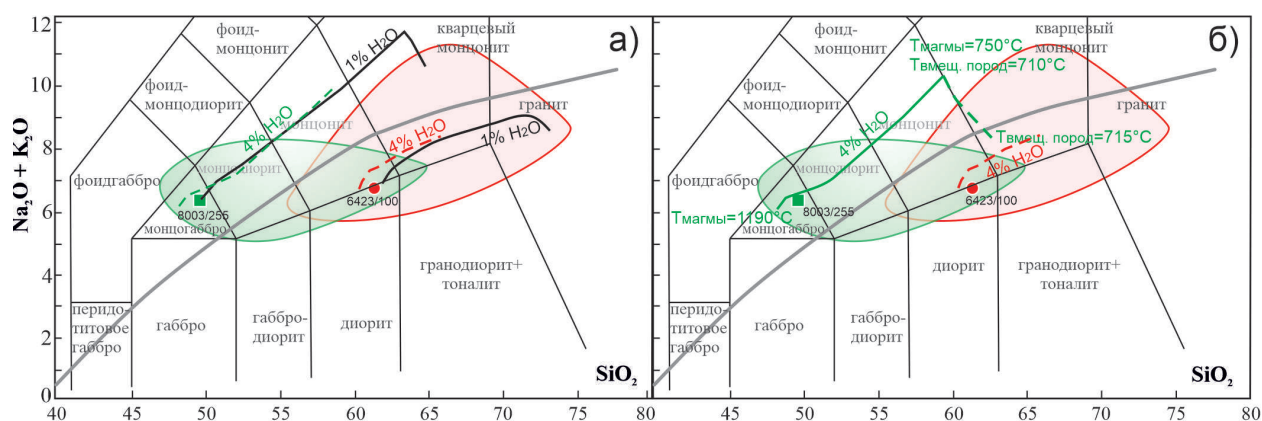


Рис. 2. Модельные тренды эволюции потуданской (зеленые линии) и павловской магм (красные линии) при FC (а) и при AFC (б) при содержании H₂O=1 вес. % (черные линии) и 4 вес. % (пунктирные линии). Полями обозначены области реальных составов потуданских (зеленое поле) и павловских пород (красное поле).

Fig. 2. Model trends of the evolution of the Potudan (green lines) and Pavlovsk magmas (red lines) during FC (a) and AFC (b) at H₂O content = 1 wt. % (black lines) and 4 wt. % (dotted lines). The fields indicate the areas of real compositions of the Potudan (green field) and Pavlovsk rocks (red field).

При увеличении содержания воды до 4 вес. %, Орх парагенезис сменяется биотитовым, который появляется при температуре ~ 900 °С. Добавление такого количества воды снижает ликвидусные температуры на 20–40 °С. Также надо отметить появление оливина на ранних этапах кристаллизации. Его отсутствие в реальных образцах может объясняться фракционированием ОI из расплава. В этом случае ОI-содержащие породы могли формироваться в промежуточных камерах или на более глубоких горизонтах батолита, не вскрытых скважинами.

При моделировании состава 6423/100 монцодиорита павловского типа, при идентичных параметрах и содержании воды до 1 вес. % остаточный расплав эволюционирует до гранитного состава (SiO₂=72 вес. %) в поле известково-щелочного тренда (рис. 2). С увеличением воды в магме до 4 вес. % появляется ранний плагиоклаз, а остаточный расплав эволюционирует до гранодиоритового состава (SiO₂=65 вес. %).

Для магмы павловского типа характерны первые минеральные парагенезисы с Орх, в отличие от потуданского типа, где первым фракционирует ОI (табл. 2, рис. 3).

Таблица 1. Содержания петрогенных оксидов (вес. %) в выбранных образцах.
 Table 1. Contents of rock-forming oxides (wt. %) in selected samples.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3,t}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Потуданский тип (обр. 8003/255)	49.05	2.01	14.09	13.89	0.14	6.11	6.64	2.87	3.27	0.84
Павловский тип (обр. 6423/100)	61.23	0.73	14.68	7.14	0.09	2.86	5.43	3.32	3.28	0.34
ТТГ Курского блока	70.67	0.3	14.93	3.2	0.14	0.88	2.54	4.39	2.84	0.1

Ведущую роль в эволюции состава павловской магмы играет кристаллизация Pl и Crx. В породах павловского типа моделируется кристаллизация более кислого Pl, по сравнению с породами потуданского типа, что соотносится с минералого-петрографическими наблюдениями.

При моделировании процесса контаминации расплава потуданского типа архейскими ТТГ-гнейсами особых изменений в эволюции состава магмы не выявлено (рис. 2 б). Согласно экспериментальным данным по дегидратационному плавлению тоналита и гранодиорита при давлении P ≤ 4 кбар, T > 900 °С и содержании H₂O ≤ 4 вес. % (Patino Douce et al., 1997), контаминация горячих водонасыщенных магм потуданского типа в верхнекоровых условиях (3 кбар) будет происходить только на поздних этапах кристаллизации и не сможет привести к изменению тренда с щелочного на известково-щелочной. Заданные условия контаминации предполагают привнос в магму

анатектических выделений при достижении 10 вес. % плавления вмещающих пород. Но для выплавки 10 вес. % ТТГ-гнейсов Курского блока на глубине, соответствующей 3 кбар, понадобилось бы прогреть вмещающую породу до 710 °С, чего не обеспечивает тепловой запас внедрившихся магм.

Таблица 2. Порядок кристаллизации минералов при разном содержании воды в магме потуданского и павловского типов в программе MCS.
 Table 2. The order of minerals crystallization at different water content in the Potudan and Pavlovsk types magma according to MCS program.

Потуданский тип		Павловский тип	
1 вес. % H ₂ O	4 вес. % H ₂ O	1 вес. % H ₂ O	4 вес. % H ₂ O
1224 °С (Ol)	1187 °С (Ol)	1149 °С (Opx)	1082 °С (Opx)
1124 °С (Ol+Spl+Cpx)	1127 °С (Ol+Spl)	1099 °С (Cpx)	1017 °С (Cpx)
1119 °С (Cpx+ Spl)	1052 °С (Cpx+ Spl)	1074 °С (Cpx+Pl (An ₅₃))	972 °С (Cpx+ Spl)
1079 °С (Cpx+ Spl+Ap)	1022 °С (Cpx+ Spl+Ap)	1004 °С (Cpx+Pl (An ₄₂)+Spl)	912–847 °С (Cpx+Spl +Pl (An ₅₆₋₄₄))
1064 °С (Cpx+ Spl+Ap+Pl (An ₅₇))	902 °С (Cpx+ Spl+Ap+Pl (An ₆₇))	884 °С (Cpx+ Pl (An ₂₂)+Spl+Kfs)	
1029 °С (Spl+Ap+Pl (An ₄₇)+Opx)	882 °С (Cpx+Spl+Pl (An ₆₂))	879 °С (Cpx+ Pl (An ₂₂)+Spl+Ap+ Kfs)	
924 °С (Spl+Ap+Pl (An ₂₇)+Opx+Kfs)	857 °С (Spl+Pl (An ₅₆)+Bt)		
909–849 °С (Cpx+Ap+Pl (An ₂₈)+Kfs+Ilm)			

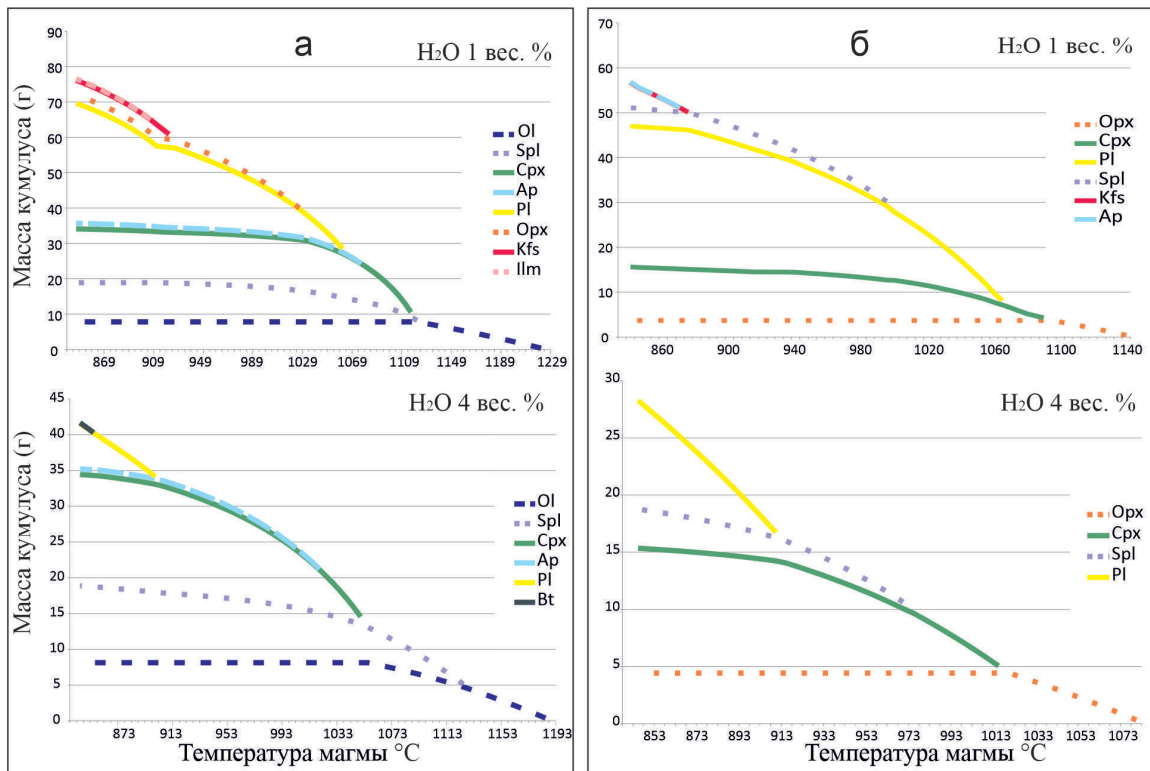


Рис. 3. Порядок кристаллизации минералов при разном содержании воды в магмах потуданского (а) и павловского (б) типов по данным моделирования в программе MCS.

Fig. 3. The order of minerals crystallization at different water contents in Potudan (a) and Pavlovsk (b) types of magmas according to MCS program.

Выводы

Проведенное моделирование подтверждает появление известково-щелочного и субщелочного эволюционных трендов при кристаллизации расплавов павловского и потуданского типа, соответственно. Необходимое минимальное содержание воды в расплаве – от 2 вес. % и выше для потуданских магм и от 4 вес. % и выше – для павловских. Контаминация расплава архейскими ТТГ-гнейсами в верхнекоровых условиях не влияет на эволюцию составов потуданской и павловской магм из-за незначительного вовлечения материала гнейсов в расплав. По результатам моделирования, нельзя получить породы потуданского и павловского типов за счет эволюции состава единой магмы.

Работа выполнена за счет финансирования темы НИР ИГГД РАН (№ FMUW-2022-0002) Минобрнауки России.

Литература

1. Петракова М.Е., Балтыбаев Ш.К. Применение Sm-Nd, Lu-Hf и U-Pb изотопных систем для решения вопроса о возможных источниках пород потуданского гранитоидного комплекса (Волго-Донской ороген) // *Материалы X Российской молодежной научно-практической Школы «Новое в познании процессов рудообразования»*. М. Изд-во: ИГЕМ РАН. 2020.
2. Петракова М.Е., Терентьев Р.А. Петрографические и минералогические признаки взаимодействия гранитоидных и габброидных магм плутона Потудань, Воронежский кристаллический массив // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2018. №1. С. 32–45. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1422>.
3. Петракова М.Е., Терентьев Р.А., Юрченко А.В., Савко К.А. Геохимия и геохронология палеопротерозойских кварцевых монцогаббро–монцодиорит–гранодиоритов плутона Потудань, Волго-Донской ороген // *Вестник СПбГУ. Изд-во: Науки о Земле*. Т. 67. № 1.
4. Щипанский А.А., Самсонов А.В., Петрова А.Ю., Ларионова Ю.О. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // *Геотектоника*. 2007. № 1. С. 43–70.
5. Andersen D.J., Lindsley D.H. New (and final!) models for the Ti-magnetite/ilmenite geothermometer and oxygen barometer // *Abstract AGU, Spring Meeting Eos Transactions*. American Geophysical Union 66. 1985. V. 18. 416 p.
6. Anderson J.L., Smith D.R. The effects of temperature and fO₂ on the Al-in-hornblende barometer // *Am. Mineral*. 1995. V. 80. P. 549–559.
7. Simow P.D., Ghiorso M.S. Algorithmic Modifications Extending MELTS to Calculate Subsolvus Phase Relations // *Am. Mineral*. 1998. V. 83. P. 1127–1131. DOI:10.2138/am-1998-9-1022.
8. Bohron W.A., Spera F.J., Ghiorso M.S., Brown G.A., Creamer J.B., Mayfield A. Thermodynamic model for energy-constrained open-system evolution of crustal magma bodies undergoing simultaneous recharge, assimilation and crystallization: the magma chamber simulator // *J. Petrol.* 2014. V. 55. P. 1685–1717. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu036>.
9. 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. P. 197–212. <https://doi.org/10.1007/bf00307281>.
10. Patino Douce A.E., Beard J.S. Dehydration melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbars // *Journal of Petrology*. 1995. V. 36. P. 707–738. DOI:10.1093/PETROLOGY/36.3.707.
11. Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2010. V. 160. P. 45–66. DOI:10.1007/s00410-009-0465-7.
12. Terentiev R.A., Savko K.A., Petrakova M.E., Santosh M., Korish E.H. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications // *Precambrian Research*. 2020. V. 346. P. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>.
13. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *Am. Mineral*. 2010. V. 95. P. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371.