

УДК 551.72;551.24.056

МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ПИКРИТ-ПИКРОБАЗАЛЬТОВЫЙ ВУЛКАНИЗМ В ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСАХ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА: ПЕТРОГЕОХИМИЯ, МЕТАМОРФИЗМ, Rb-Sr И ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS СИСТЕМАТИКА

И. И. Лиханов^{1*}, П. С. Козлов², А. Д. Ножкин¹, Ю. Л. Ронкин²,
А. А. Крылов¹

¹ Институт геологии и минералогии СО РАН им. В. С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090), *likh@igm.nsc.ru

² Институт геологии и геохимии УрО РАН им. А. Н. Заварицкого (ул. Акад. Вонсовского, 15, Екатеринбург, Россия, 620110)

Обосновывается раннемезопротерозойский (1370 млн лет) возраст пикрит-пикробазальтового вулканизма и связанный с ним метаморфизм в рифтогенной Ишимбинско-Татарской шовной зоне (палеорифте) на юго-западе Сибирского кратона. Осуществлена петрогеохимическая типизация метавулканогенно-осадочных комплексов с целью установления их протолитов и корреляции. Приведены первые данные по Rb-Sr и ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS систематике позднедокембрийских метавулканогенных пород в северной части Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса в центральной части Северо-Енисейского кряжа. По петрогеохимическому составу протолиты метавулканитов соответствуют пикробазальтам и базальтам, реже пикритам. Вулканогенно-осадочная толща на разных участках залегает на едином маркирующем горизонте углеродистых сланцев, что позволяет скоррелировать возраст вулканогенной панимбинской толщи с кординской свитой, рассматривая эти образования на стратоевровне раннего мезопротерозоя. Геотермобарометрия и анализ особенностей регионального метаморфизма вулканогенно-осадочных пород опорных участков показывают неоднородный характер PT -условий преобразования исходных пород: 4,8–4,9 кбар/527–549 °C – метатиффиты пикробазальтов; 5,0–5,8 кбар/543–612 °C – метабазиты; 3,5–4,6 кбар/522–636 °C – метапелиты. По характеру метаморфической зональности прогрессивный метаморфизм изученных пород относится к сравнительно малоглубинному LP/HT андалузит-силлиманитовому айдахскому типу (бьюкенский тип зональности). Его PT -условия соответствуют переходу от фации зеленых сланцев до границы между эпидот-амфиболитовой и амфиболитовыми фациями. По времени проявления (1056–996 млн лет) метаморфизм близок к гренвилльской тектонической эпохе. Установленный возраст пикрит-пикробазальтового вулканизма в докембрии Енисейского кряжа коррелируется с временем проявления трондьемитов немтихинского комплекса и с реперным машакским плюмовым магматизмом на Южном Урале, проявленными в геодинамической обстановке растяжения континентальной коры в период распада суперконтинента Нуна.

Ключевые слова: пикрит-пикробазальтовый вулканизм; метаморфизм; Rb-Sr и ^{147}Sm - ^{143}Nd систематика; мезопротерозой; Енисейский кряж

Для цитирования: Лиханов И. И., Козлов П. С., Ножкин А. Д., Ронкин Ю. Л., Крылов А. А. Мезопротерозойский пикрит-пикробазальтовый вулканизм в докембрийских комплексах Енисейского кряжа: петрогеохимия, метаморфизм, Rb-Sr и ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS систематика // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 85–90. doi: 10.17076/geo2149

Финансирование. Работа выполнена за счет средств РНФ (проект № 21-77-20018-П).

I. I. Likhanov^{1*}, P. S. Kozlov², A. D. Nozhkin¹, Yu. L. Ronkin², A. A. Krylov¹. MESOPROTEROZOIC PICRITE-PICROBASALT VOLCANISM OF PRECAMBRIAN COMPLEXES IN THE YENISEI RANGE: PETROGEOCHEMISTRY, METAMORPHISM, Rb-Sr and ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS SYSTEMATICS

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptyug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia), *likh@igm.nsc.ru

² Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (15 Akad. Vonsovsky St., 620110 Ekaterinburg, Russia)

The Early Mesoproterozoic (1370 Ma BP) age of picrite-picrobasalt volcanism and the associated metamorphism in the riftogenic Ishimbinsko-Tatarskaya suture zone (paleorift) in the southwest of the Siberian Craton is substantiated. Petrogeochemical typification of metavolcanogenic-sedimentary complexes is carried out to establish their protoliths and correlation. First data on Rb-Sr and ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS systematics of late Precambrian metavolcanogenic rocks in the northern part of the Rybinsk-Panimba volcanic belt in the central part of the North Yenisei Range are presented. According to the petrogeochemical composition, the protoliths of the metavolcanites correspond to picrobasalts and basalts, less often to picrites. As the volcanogenic-sedimentary strata in different areas occur on a single marker horizon of carbonaceous shales, we can correlate the age of the volcanogenic Panimba sequence with the Korda suite, considering these formations at the stratolevel of the Early Mesoproterozoic. Geothermobarometry and analysis of the features of regional metamorphism of volcanogenic-sedimentary rocks in the reference areas show a heterogeneous nature of the *PT* conditions of transformation of the original rocks: 4.8–4.9 kbar/527–549 °C – metatuffites of picrobasalts; 5.0–5.8 kbar/543–612 °C – metabasites; 3.5–4.6 kbar/522–636 °C – metapelites. According to the metamorphic zoning pattern, the progressive metamorphism of the studied rocks belongs to the relatively shallow *LP/HT* andalusite-sillimanite Idaho type (Buchan type of zoning). Its *PT* conditions correspond to a transition from the greenschist facies to the boundary between the epidote-amphibolite and amphibolite facies. In terms of the time of manifestation (1056–996 Ma), the metamorphism is close to the Grenville tectonic epoch. The established Precambrian age of picrite-picrobasalt volcanism in the Yenisei Range correlates with the time of manifestation of trondhjemites of the Nemtikhinsky complex and with the reference Mashak plume magmatism in the Southern Urals, which were manifested in a geodynamic setting of continental crust stretching during the breakup of the Nuna supercontinent.

Keywords: picrite-picrobasalt volcanism; metamorphism; Rb-Sr and ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS systematics; Mesoproterozoic; Yenisei Range

For citation: Likhanov I. I., Kozlov P. S., Nozhkin A. D., Ronkin Yu. L., Krylov A. A. Mesoproterozoic picrite-picrobasalt volcanism of Precambrian complexes in the Yenisei Range: petrogeochemistry, metamorphism, Rb-Sr and ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS systematics. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 85–90. doi: 10.17076/geo2149

Funding. The study was funded by a Russian Science Foundation grant (project #21-77-20018-П).

Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа, представляющего собой коллизивно-аккреционный ороген на западной окраине Сибирского кратона, важна не только

для понимания тектонической эволюции подвижных поясов, но и для верификации данных палеомагнитного моделирования о конфигурации древнего суперконтинента Нуна.

Детальный обзор мировых возрастных аналогов рифтогенных и внутриплитных магматических событий в интервале времени 1380–1350 млн лет, установленных в структурах ряда крупных кратонов суперконтинента Нуна, приведен в работе [Likhanov, Santosh, 2019]. Тем не менее проблемы оценки геохронологических рубежей в истории этого суперконтинента во многом остаются дискуссионными и далеки от окончательного решения. Это связано с дефицитом геохимических данных и возрастных датировок, включающих периоды его становления и распада, что ограничивает возможности временных корреляций глобальных геологических процессов в истории Земли. Попытка восполнения этого пробела предпринята в настоящей статье, где обсуждаются особенности происхождения, возрастной рубеж и стратиграфический уровень пикрит-пикробазального вулканизма Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса на юго-западе Сибирского кратона.

Объект исследования – Ишимбинско-Татарская шовная зона, включающая Рыбинско-Панимбинский вулканический пояс (РПВП) [Ножкин и др., 2011]. Здесь изучены Панимбинский и Михайловский опорные участки, расположенные на севере РПВП. На Панимбинском участке интерес представляет панимбинская толща, сложенная метаморфизованными туффитами и туфами пикробазальтов и метаосадочными породами [Козлов, Лиханов, 2024]. Толща метаспород Михайловского участка имеет неоднородное строение, в ее составе преобладают актинолитовые, хлорит-актинолитовые амфиболиты и двуполевошпатовые амфибол-диопсидовые метавулканиды. Перекрываются метавулканиды черными глиноземистыми слюди-сто-графитистыми сланцами с кордиеритом и андалузитом. Метаморфические породы района исследований слагают юго-восточную периферию Тейского метаморфического комплекса [Лиханов и др., 2011].

Результаты термобарометрии показали видимые различия в пределах погрешностей методов [Likhanov et al., 2004] по PT -параметрам метаморфических преобразований толщ разного химического состава: 4,8–4,9 кбар/527–549 °C – метатуффиты пикробазальтов; 5,0–5,8 кбар/543–612 °C – метабазиты; 3,5–4,6 кбар/522–636 °C – метапелиты.

Результаты изучения Rb-Sr и ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS-изотопной систематики выполнены для образцов пород в целом и выделенных из них минералов (диопсиды, амфибол, плагиоклазы), представляющих кординскую свиту и панимбинскую толщу Ишимбинско-Татарской шовной зоны в северной части РПВП соответственно (табл.).

ID-TIMS-данные, характеризующие изотопный состав Rb-Sr-вулканида из основания нижней пачки метавулканогенно-осадочных пород кординской свиты (образец П-517-5) и выделенных из нее минералов двух диопсидов и плагиоклазов, на графике Николайсена удовлетворяет линии регрессии, наклон которой в указанных координатах определяет возраст метаморфизма 827 ± 17 млн лет и величину первичного отношения изотопов стронция $0,72051 \pm 0,00089$. Параметры референсной линии на графике $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ для плагиоклаза Pl_1 и амфибола Amp_1 соответствуют возрасту 1363 ± 21 млн лет, $\varepsilon_{\text{Nd}}(1363) = -2,6$. Наконец, ^{147}Sm - ^{143}Nd модельный возраст, соответствующий точке пересечения линий эволюции изотопного состава неодайма породы и деплетированного резервуара (DM) на графике T vs. $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$, имеет величину 2642 млн лет.

На графике в координатах $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ фигуративные точки породы в целом метаморфизованного туфа (образец П-514-1) и выделенного из нее амфибола удовлетворяют линии согласования, параметры которой диагностируют среднерифейский возраст 1377 ± 40 млн лет, а также наличие существенного вклада корового материала, что подтверждается величиной $\varepsilon_{\text{Nd}}(1377) = -7,0$. Вычисленный в рамках модельных представлений об эволюции деплетированной мантии неодимовый возраст T_{DM} 2502 млн лет свидетельствует о как минимум неоархей-палеопротерозойском протолите.

Полученные значения возраста внутриплитного вулканизма и связанного с ним рифтогенного метаморфизма в Ишимбинско-Татарской шовной зоне тождественны с Rb-Sr, ^{147}Sm - ^{144}Nd , U-Pb TIMS и SHRIMP-II (циркон) изотопией для границы бурзяния (R_1) и юрматиния на Южном Урале (R_2) [Ronkin et al., 2016].

Выводы. Геологические, петролого-геохимические и изотопно-геохронологические Rb-Sr и ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS-результаты являются основанием для стратиграфической корреляции разрезов метавулканогенно-осадочной толщи кординской свиты Михайловского участка и метапикритов, ультраосновных и основных пикробазальтов панимбинской толщи Панимбинского участка. Проведенные исследования свидетельствуют о раннемезопротерозойском (~1370 млн лет) возрасте пикрит-пикробазального вулканизма и связанного с ним метаморфизма в рифтогенной Ишимбинско-Татарской шовной зоне (палеорифте) на юго-западе Сибирского кратона. Этот возрастной рубеж интерпретируется как время деструкции докембрийских комплексов на западе Сибирского кратона.

Rb-Sr- и ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS-изотопная систематика пород и минералов Ишимбинско-Татарской шовной зоны в северной части Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса

Rb-Sr and ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS isotopic systematics of rocks and minerals of the Ishimbinsk-Tatarsk seam zone in the northern part of the Rybinsk-Panimbinsk volcanic belt

Образец Sample	Порода, минерал Rocks, minerals	Толща/свита/ массив Thickness/ suite/massif	Изотопная система Isotope system	Возраст, млн лет Age, Ma IR, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	Графическое представление Plots
П-517-5, Р-517-5	Метавулканит (Wr), диопсид (Di), амфибол (Amp), плагиоклаз (Pl) Metavolcanite (Wr), diopside (Di), amphibole (Amp), plagioclase (Pl)	Кординская свита, R ₁ Kordinskaya suite, R ₁	Rb-Sr	827 ± 17, 0,72051 ± 0,00089	
			^{147}Sm - ^{143}Nd	1363 ± 21, $\epsilon_{\text{Nd}}(1363) = -2,6$	
				$T_{\text{DM}} = 2642$, $\epsilon_{\text{Nd}}(827) = -13,4$, $\epsilon_{\text{Nd}}(1363) = 8,2$	
П-514-1, Р-514-1	Метаморфизо- ванный туф (туфолава?) пикробазальта (Wr), амфибол (Amp) Metamorphosed tuff (tuff lava?) of picobasalt (Wr), amphibole (Amp)	Панимбинская толща, R ₃ Panimbinskaya strata, R ₃	^{147}Sm - ^{143}Nd	1377 ± 40, $\epsilon_{\text{Nd}}(1377) = -7,0$	
				$T_{\text{DM}} = 2502$, $\epsilon_{\text{Nd}}(1377) = -7,0$	

Примечание. R1 – Нижнерифейская система, 1350–1650 млн лет. IR – Initial Ratio. Wr – порода в целом. $T_{\text{DM-1st}}$, $T_{\text{DM-2st}}$ – одностадийный и двухстадийный Nd-модельный возраст. CHUR, DM – линии эволюции хондритового и деплетированного модельных резервуаров.

Note. R1 – Lower Riphean system, 1350–1650 Ma. IR – Initial Ratio. Wr – whole rock. $T_{\text{DM-1st}}$, $T_{\text{DM-2st}}$ – one-stage and two-stage Nd model age. CHUR, DM – evolution lines of the chondrite and depleted model reservoirs.

Возрастные аналоги рифтогенных и внутриплитных магматических событий в интервалах времени 1380–1350 млн лет и связанных с ними последующих процессов метаморфизма имеют место и в других регионах мира [Roger, Santosh, 2002]. Установленный возраст рифтогенного пикрит-пикробазальтового вулканизма и метаморфизма коррелирует со временем формирования плагиогранитов немтихинского комплекса [Likhanov, 2022] и с Машакским субглобальным плюмовым магматизмом, проявленными в геодинамической обстановке растяжения в период распада суперконтинента Нуна [Reverdatto et al., 2019].

Литература

- Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С., Вершинин А. Е. Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского кряжа – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // ДАН. 2011. Т. 436, № 4. С. 509–514.
- Лиханов И. И., Зиновьев С. В., Козлов П. С. Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. № 1. С. 412–465. doi: 10.31857/S0016853X21010070
- Hietanen A. On the facies series in various types of metamorphism // J. Geol. 1967. Vol. 75. P. 187–214. doi: 10.1086/627246
- Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia // Geological Society of London, Special Publications. 2019. Vol. 478. P. 89–115. doi: 10.1144/SP478.11
- Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence // Geosciences (Switzerland). 2022. Vol. 12, no. 11. Art. 402. doi: 10.3390/geosciences12110402
- Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // Geol. J. 2020. Vol. 55, no. 6. P. 4772–4789. doi: 10.1002/gj.3716
- Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia // J. Metamorphic Geol. 2004. Vol. 22. P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x
- Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiller V. V., Sukhorukov V. P. P-T-t constraints on poly-metamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions // J. Asian Earth Sci. 2015. Vol. 113. P. 391–410. doi: 10.1016/j.jseae.2014.10.026
- Pattison D. R. M. Instability of Al_2SiO_5 “triple point” assemblages in muscovite + biotite + quartz-bearing metapelites, with implications // Am. Mineral. 2001. Vol. 86. P. 1414–1422.
- Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer, 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2
- Hietanen A. On the facies series in various types of metamorphism. J. Geol. 1967;75:187–214. doi: 10.1086/627246
- Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Vershinin A. E. The Teya polymetamorphic complex in the Transangarian Yenisei Ridge: an example of metamorphic superimposed zoning of low- and medium-pressure facies series. Doklady Earth Sciences. 2011;436(2):213–218. doi: 10.1134/S1028334X11020048
- Likhanov I. I., Zinoviev S. V., Kozlov P. S. Blastomylonite complexes of the Western Yenisei Ridge (Eastern Siberia, Russia): geological position, metamorphic evolution and geodynamic models. Geotectonics. 2021; 55(1):36–57. doi: 10.1134/S0016852121010076
- Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. Geological Society of London, Special Publications. 2019;478:89–115. doi: 10.1144/SP478.11
- Likhanov I. I. Provenance, age and tectonic settings of rock complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): geochemical and geochronological evidence. Geosciences (Switzerland). 2022;12(11):402. doi: 10.3390/geosciences12110402
- Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited. Geol. J. 2020;55(6): 4772–4789. doi: 10.1002/gj.3716
- Likhanov I. I., Polyansky O. P., Reverdatto V. V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, Eastern Siberia. J. Metamorph. Geol. 2004;22(8): 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x
- Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiller V. V., Sukhorukov V. P. P-T-t constraints on poly-metamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions. J. Asian Earth Sci. 2015;113: 391–410. doi: 10.1016/j.jseae.2014.10.026
- Pattison D. R. M. Instability of Al_2SiO_5 “triple point” assemblages in muscovite + biotite + quartz-bearing metapelites, with implications. Am. Mineral. 2001;86: 1414–1422.
- Reverdatto V. V., Likhanov I. I., Polyansky O. P., Sheplev V. S., Kolobov V. Y. The nature and models of metamorphism. Cham: Springer Geology. 2019. 330 p. doi: 10.1007/978-3-030-03029-2

Поступила в редакцию / received: 29.07.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лиханов Игорь Иванович

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: likh@igm.nsc.ru

Козлов Павел Сергеевич

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: kozlov@igg.uran.ru

Ножкин Александр Дмитриевич

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: nozhkin@igm.nsc.ru

Ронкин Юрий Лазаревич

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: y-ronkin@mail.ru

Крылов Александр Александрович

младший научный сотрудник
e-mail: krylov@igm.nsc.ru

CONTRIBUTORS:

Likhanov, Igor

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher

Kozlov, Pavel

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher

Nozhkin, Alexander

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher

Ronkin, Yuri

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Krylov, Alexander

Junior Researcher