

УДК 550.84.094

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНЫЕ ИНДИКАТОРЫ ИСТОЧНИКОВ РАСПЛАВОВ ДЛЯ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ КОРОВЫХ АДАКИТОВ САРМАТИИ

К. А. Савко^{1,2*}, А. В. Самсонов¹, С. В. Цыбуляев², Е. Х. Кориш²

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
(Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017), *ksavko@geol.vsu.ru

² Воронежский государственный университет (Университетская пл., 1, Воронеж,
Россия, 394018)

Получены первые данные по возрасту, элементной и изотопной геохимии для С-адакитов Сарматии в пределах Тимского и Воронцовского террейнов с архейским континентальным и палеопротерозойским океаническим типами коры соответственно. В Тимском задуговом бассейне субвулканические тела риолитов с адакитовыми геохимическими характеристиками имеют возраст около 2,05 млрд лет. Они являются метаглиноземистыми и железистыми, с повышенным количеством щелочей и преобладанием K_2O над Na_2O . В Воронцовском террейне субвулканические тела дацитовых и риолитовых порфиров имеют возраст около 2,07 млрд лет, представляют собой железистые метаглиноземистые породы щелочно-известковой серии. Натровая специализация, низкие концентрации Mg, Cr, Ni, несовместимых элементов с резким фракционированием REE и отсутствием Eu^* -аномалий, высокие значения отношения Sr/Y и особенно (Gd/Yb)_n, а также радиогенный изотопный состав Nd предполагают ювенильный базитовый источник кислых расплавов. Палеопротерозойские коровые адакиты Сарматии образовались при распаде коллизионного орогена из очагов плавления в основании коры (> 60 км) в равновесии с гранатсодержащим реститом. Калиевые риолиты с адакитовыми характеристиками в Тимском террейне образовались так же, как и натровые риолиты и дациты в Воронцовском террейне, – при распаде единого коллизионного орогена из очагов плавления в основании коры при высоких давлениях в равновесии с гранатсодержащим реститом. Однако они контрастно отличаются по геохимии и изотопии Nd в зависимости от источника – архейская континентальная кора в Тимском террейне с преобладанием ТТГ и палеопротерозойская базитовая океаническая в Воронцовском.

Ключевые слова: коровые адакиты; Сарматия; архей; палеопротерозой; источники расплавов

Для цитирования: Савко К. А., Самсонов А. В., Цыбуляев С. В., Кориш Е. Х. Геохимические и изотопные индикаторы источников расплавов для палеопротерозойских коровых адакитов Сарматии // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 134–137. doi: 10.17076/geo2201

**K. A. Savko^{1,2*}, A. V. Samsonov¹, S. V. Tsybulyaev², E. H. Korish².
GEOCHEMICAL AND ISOTOPIC INDICATORS OF MELT SOURCES FOR
PALEOPROTEROZOIC CRUSTAL ADAKITES OF SARMATIA**

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry,
Russian Academy of Sciences (35 Staromonetnyi Per., 119017 Moscow, Russia),
ksavko@geol.vsu.ru

²*Voronezh State University (1 Universitetskaya Sq., 394018 Voronezh, Russia)*

We have obtained the first data on the age, elemental and isotopic geochemistry for C-adakites of Sarmatia within the Tim and Vorontsovka terranes with the Archean continental and Paleoproterozoic oceanic crust types, respectively. In the Tim back-arc basin, subvolcanic bodies of rhyolites with adakitic geochemical characteristics have an age of ~2.05 Ga. They are metaluminous and ferruginous, with an elevated amount of alkalis and a predominance of K₂O over Na₂O. In the Vorontsovka terrane, dacite and rhyolite porphyries have an age of about 2.07 Ga. They are ferruginous, metaluminous rocks of the calcic-alkaline series. The Na specialization, low concentrations of Mg, Cr, Ni, and incompatible elements with high REE fractionation and absence of Eu* anomalies, high Sr/Y and especially (Gd/Yb)_n ratios, and radiogenic Nd isotope composition suggest a juvenile basite source of the felsic melts. Paleoproterozoic Sarmatian crustal adakites were derived by the breakup of a collisional orogen from melting centers in the lower crust (> 60 km) in equilibrium with garnet-bearing restite. K-rhyolites with adakitic characteristics in the Tim terrane were derived in the same way as Na-rhyolites and dacites in the Vorontsovka terrane, through the breakup of a single collisional orogen from melting centers in the lower crust under high pressure in equilibrium with garnet. However, they differ sharply in geochemistry and Nd isotope composition depending on the source – the Archean continental crust of the TTG-predominated Tim terrane and the Paleoproterozoic basite oceanic crust in the Vorontsovka terrane.

Keywords: C-adakite; Sarmatia; Archean; Paleoproterozoic; melt sources

For citation: Savko K. A., Samsonov A. V., Tsybulyaev S. V., Korish E. Kh. Geochemical and isotopic indicators of melt sources for Paleoproterozoic crustal adakites of Sarmatia. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 134–137. doi: 10.17076/geo2201

В континентальных обстановках обнаружены кислые вулканы, близкие к адакитам, которые предположительно являются продуктами плавления мафитов при высоких давлениях [Ma et al., 2015]. Таким образом, они служат индикатором увеличения мощности или обрушения нижней коры и образования магматических очагов на глубинах более 50 км. Такие выводы основаны на экспериментах и моделировании выплавления адакитов из источника, близкого к MORB [Rapp, Watson, 1995; Hastie et al., 2016]. Однако калиевые адакиты с низкорadioгенным составом Nd имеют источник, отличающийся от MORB. Состав источника оказывает глубокое влияние на геохимию континентальных адакитов, что ярко проявлено в палеопротерозойских кислых вулканах Сарматии.

Недавно предложена геодинамическая модель для крупной кислой изверженной провинции Сарматии с возрастом 2,08–2,07 млрд лет, в основу которой положен механизм пологой субдукции [Савко и др., 2024а]. Причиной объемного магматизма в Тимском террейне

Курского архейского блока, Лосевском, Донском и Воронцовском террейнах Волго-Донского орогена мог быть подъем астеносферной мантии при разрушении пододвинутой океанической плиты в результате пологой субдукции, что привело к внутрикоровому плавлению в верхней плите, состоящей из разновозрастных фрагментов архейской и палеопротерозойской коры. В интервале 2,07–2,05 млрд лет в результате коллизии при движении палеопротерозойской океанической плиты со стороны Волго-Донского орогена под архейскую континентальную кору Курского блока произошло увеличение мощности коры. Повышенный тепловой поток вызвал плавление в основании коры, состоящей из спаянных в результате недавней субдукции фрагментов архейской континентальной (ТТГ) и палеопротерозойской океанической коры. Очаги плавления в основании коры на глубинах 60–70 км могли служить источниками расплавов для коровых адакитов. Нами получены первые данные по возрасту, составу и изотопной геохимии для

коровых адакитов Тимского и Воронцовского террейнов с архейской континентальной и палеопротерозойской океанической типами коры соответственно.

Воронцовский террейн. Субвулканические тела дацитовых и риолитовых порфиров с возрастом ~2069 млн лет прорывают метатерригенные флишоидные толщи воронцовской серии [Савко и др., 2024б]. Они являются железистыми, метаглиноземистыми породами щелочно-известковой серии. Натровая специализация, низкие концентрации Mg, Cr, Ni, несовместимых элементов с резким фракционированием REE и отсутствием Eu^* -аномалий, высокие значения отношения $Sr/Y = 83-150$ и особенно $(Gd/Yb)_n > 10$, а также радиогенный изотопный состав Nd ($\epsilon Nd(2069) = 2,6$) предполагают ювенильный базитовый источник кислых расплавов. Необходимые условия могли быть реализованы при частичном плавлении деплетированных базитов N-MORB типа в равновесии с эклогитовым реститом. В контексте эволюции литосферы Волго-Донского орогена мы полагаем, что они сформировались при частичном плавлении нижних горизонтов (> 60 км) палеопротерозойской эклогитизированной океанической коры сильно увеличенной мощности в результате предшествующих коллизионных процессов. Изменения составов от дацитов к риолитам могут быть связаны с кристаллизационной дифференциацией.

Тимский террейн. В Тимском задуговом бассейне встречены субвулканические тела риолитов с адакитовыми геохимическими характеристиками, прорывающие углеродистые сланцы тимской свиты. Их возраст около 2,05 млрд лет. Риолиты метаглиноземистые и железистые ($X_{Mg} = 0,05-0,21$), с повышенным количеством щелочей ($K_2O + Na_2O = 7,7-9,8 \%$) и преобладанием K_2O над Na_2O ($K_2O/Na_2O = 1,0-2,0$). Имеют низкие содержания совместимых (Cr, Ni, Sc и V), литофильных (Ba и Sr), высокозарядных (Y, Zr) и редкоземельных ($\Sigma REE < 100$ ppm) элементов, высокие – Ga ($10000Ga/Al > 2,6$) и Nb. Наиболее яркой чертой риолитов является аномальное фракционирование LREE ($La_N/Yb_N = 78-211$) и HREE ($Gd_N/Yb_N = 14-36$) и отрицательные Eu-аномалии ($Eu/Eu^* = 0,43-0,61$). Они имеют широкие вариации изотопного состава Nd ($\epsilon Nd(T) = -10,0$ до $+2,6$) и модельных возрастов – от архейских до палеопротерозойских. Сочетание высокого содержания SiO_2 и Ga, низкого Zr и значений отношения $Zr/Hf = 21-29$ указывает на сильное фракционирование расплавов [Breiter et al., 2014]. Тем не менее такие параметры, как изотопный состав Nd и аномальное обеднение

тяжелыми РЗЭ, не могли быть «сдвинуты» при фракционировании первичных магм [Wu et al., 2017] и служат важными индикаторами для определения их источников.

Такие признаки предполагают неоднородные по составу и возрасту источники риолитов в нижней коре увеличенной мощности (≥ 60 км) в равновесии с гранатом и последующей интенсивной дифференциацией в малоглубинных условиях, что сближает их с нижнекоровыми адакитами (C-adakite) [Xiao, Clemens, 2007; Лучицкая, 2022]. Так же как и коровые адакиты, они имеют невысокое содержание Sr. В источнике преобладал архейский коровый компонент, что подтверждается присутствием унаследованного архейского циркона, но присутствовал и ювенильный палеопротерозойский субдукционный материал, что дополняет картину возрастной гетерогенности литосферы Тимского террейна. Учитывая, что высококалиевые риолиты невозможно получить при частичном плавлении базитов даже при давлении в нижней коре увеличенной мощности [Rapp, Watson, 1995], скорее всего, архейские ТТГ доминировали в коровом источнике, а в промежуточных очагах происходило их фракционирование.

Таким образом, риолиты с адакитовыми характеристиками в Тимском террейне образовались так же, как и риолиты и дациты в Воронцовском террейне, – при распаде единого коллизионного орогена в результате плавления в основании коры при высоких давлениях в равновесии с гранатсодержащим реститом. Однако они имеют контрастную геохимию и изотопный состав Nd, что обусловлено различными источниками расплавов. В Воронцовском террейне они отвечали палеопротерозойским базитам типа N-MORB, а в Тимском преобладали архейские ТТГ.

Литература

- Лучицкая М. В. Адакитовый магматизм – состав, петрогенезис, геодинамическая обстановка и аспект применения термина «адакит» // Геотектоника. 2022. № 4. С. 92–128. doi: 10.31857/S0016853X22040051
- Савко К. А., Самсонов А. В., Кориш Е. Х., Базиков Н. С., Ларионов А. Н. Палеопротерозойские дайки дацитов Воронцовского террейна Волго-Донского орогена: геохимия, возраст и петрогенезис // Петрология. 2024б. Т. 32, № 2. С. 139–153. doi: 10.31857/S0869590324020018
- Савко К. А., Самсонов А. В., Кориш Е. Х., Ларионов А. Н., Сальникова Е. Б., Иванова А. А., Базиков Н. С., Цыбуляев С. В., Червяковская М. В. Гранитоидные интрузии на краю Курского блока как часть палеопротерозойской кислой крупной изверженной провинции восточной Сарматии // Петрология.

2024a. T. 32, № 6. C. 647–678. doi: 10.31857/S0869590324060018

Breiter K., Lamarão C. N., Borges R. M., Dall'Agnol R. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites // *Lithos*. 2014. Vol. 192–195. P. 208–225. doi: 10.1016/j.lithos.2014.02.004

Hastie A. R., Fitton J. G., Bromiley G. D., Butler I. B., Odling N. W. A. The origin of Earth's first continents and the onset of plate tectonics // *Geology*. 2016. Vol. 44. P. 855–858. doi: 10.1130/G38226.1

Ma Q., Zheng J., Xu Y., Griffin W. L., Zhang R. Are continental "adakites" derived from thickened or foundered lower crust? // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015. Vol. 419. P. 125–133. doi: 10.1016/j.epsl.2015.02.036

Rapp R. P., Watson E. B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust–mantle recycling // *J. Petrol.* 1995. Vol. 36. P. 891–931. doi: 10.1093/petrology/36.4.891

Wu F., Liu X., Ji W., Wang J., Yang L. Highly fractionated granites: Recognition and research // *Sci. China Earth Sci.* 2017. Vol. 60. P. 1201–1219. doi: 10.1007/s11430-016-5139-1

Xiao L., Clemens J. D. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints // *Lithos*. 2007. Vol. 95. P. 399–414.

References

Breiter K., Lamarão C. N., Borges R. M., Dall'Agnol R. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites. *Lithos*. 2014;192-195:208–225. doi: 10.1016/j.lithos.2014.02.004

Hastie A. R., Fitton J. G., Bromiley G. D., Butler I. B., Odling N. W. A. The origin of Earth's first continents and the onset of plate tectonics. *Geology*. 2016;44: 855–858. doi: 10.1130/G38226.1

Luchitskaya M. V. The composition, petrogenesis, and geodynamic setting of adakite magmatism: an overview. *Geotectonics*. 2022;56(4):486–519. doi: 10.1134/S0016852122040057

Ma Q., Zheng J., Xu Y., Griffin W. L., Zhang R. Are continental "adakites" derived from thickened or foundered lower crust? *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015;419: 125–133. doi: 10.1016/j.epsl.2015.02.036

Rapp R. P., Watson E. B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust–mantle recycling. *J. Petrol.* 1995;36: 891–931. doi: 10.1093/petrology/36.4.891

Savko K. A., Samsonov A. V., Korish E. Kh., Bazikov N. S., Larionov A. N. Paleoproterozoic dacite dykes of the Vorontsovka Terrane, Volga-Don Orogen: geochemistry, age, and petrogenesis. *Petrology*. 2024;32(2): 165–178. doi: 10.1134/S0869591124020073

Savko K. A., Samsonov A. V., Korish E. Kh., Larionov A. N., Salnikova E. B., Ivanova A. A., Bazikov N. S., Tsybulyaev S. V., Chervyakovskaya M. V. Granitoid intrusions at the periphery of Kursk Block as part of a Paleoproterozoic Silicic large igneous province in Eastern Sarmatia. *Petrology*. 2024;32(6):719–771. doi: 10.1134/S0869591124700218

Wu F., Liu X., Ji W., Wang J., Yang L. Highly fractionated granites: Recognition and research. *Sci. China Earth Sci.* 2017;60:1201–1219. doi: 10.1007/s11430-016-5139-1

Xiao L., Clemens J. D. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. *Lithos*. 2007;95:399–414.

Поступила в редакцию / received: 28.08.2025; принята к публикации / accepted: 02.09.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Савко Константин Аркадьевич

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
ИГЕМ РАН, профессор ВГУ

e-mail: ksavko@geol.vsu.ru

Самсонов Александр Владимирович

чл.-корр. РАН, д-р геол.-мин. наук,
главный научный сотрудник

e-mail: samsonovigem@mail.ru

Цыбуляев Сергей Владимирович

преподаватель геологического факультета

e-mail: stsybulyaev@bk.ru

Кориш Екатерина Хафисовна

старший преподаватель геологического факультета

e-mail: korish_k@rambler.ru

CONTRIBUTORS:

Savko, Konstantin

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

Samsonov, Alexander

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher

Tsybulyaev, Sergey

Lecturer

Korish, Ekaterina

Senior Lecturer