

УДК 551.72;551.24.056

СВИДЕТЕЛЬСТВА СОБЫТИЙ ГРЕНВИЛЬСКОГО ВОЗРАСТА НА ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА НА ПРИМЕРЕ ГРАНИТОИДОВ РЯЗАНОВСКОГО МАССИВА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

А. Д. Ножкин^{1*}, О. М. Туркина¹, И. И. Лиханов¹, Ю. Л. Ронкин²

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

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

Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов на границах древних кратонов, но и для решения вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав древнего суперконтинента Родиния. По результатам минералого-петрологических, геохимических и изотопно-геохронологических исследований получены новые данные по петрогеохимическому составу, особенностям петрогенезиса, U-Pb-возрасту циркона, Sr- и Nd-изотопным параметрам пород Рязановского гранитоидного массива, расположенного вблизи Приенисейской зоны разломов Енисейского кряжа. Эти породы представлены высокожелезистыми разностями и сопоставимы с А-гранитами или высокодифференцированными I-гранитами. Их состав эволюционирует от нормальных до субщелочных гранитов и лейкогранитов, отличающихся повышенными концентрациями высоkozарядных и радиоактивных элементов. Изотопные (Sr, Nd) характеристики пород свидетельствуют в пользу генерации из древнего корового субстрата, усредненный возраст которого отвечает палеопротерозою. Формирование этих гранитов на рубеже мезо-неопротерозоя ($1013 \pm 9,9$ млн лет) отвечает раннему этапу гренильской орогении на юго-западе Сибирского кратона. Геодинамическая история региона сопоставляется с синхронной последовательностью и схожим стилем тектоно-термальных событий по периферии крупных докембрийских кратонов Лаврентии и Балтики, что подтверждает палеоконтинентальные реконструкции о тесных пространственно-временных связях между этими кратонами, Сибирью и их вхождении в состав Родинии. Новые доказательства коллизионных событий гренильского возраста в комплексе с другими возрастными эквивалентами в пределах западной окраины Сибирского кратона позволяют разрешить ряд противоречий в трактовке ключевых вопросов геологии и тектоники этого региона.

Ключевые слова: гранитоиды; петрогеохимия; U-Pb-датирование; Sr- и Nd-изотопный состав; гренильский оротенез; Енисейский кряж

Для цитирования: Ножкин А. Д., Туркина О. М., Лиханов И. И., Ронкин Ю. Л. Свидетельства событий гренильского возраста на западной окраине Сибирского кратона на примере гранитоидов Рязановского массива (Енисейский кряж) // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 114–118. doi: 10.17076/geo2175

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

A. D. Nozhkin^{1*}, O. M. Turkina¹, I. I. Likhanov¹, Yu. L. Ronkin². EVIDENCE OF GREENVILLE AGE EVENTS AT THE WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON: THE CASE OF THE RYAZANOVSKY GRANITOID MASSIF (YENISEI RANGE)

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

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

Studies of the geological history of the Yenisei Range, which is a collisional-accretionary orogen in the western margin of the Siberian Craton, are crucial not only for understanding the tectonic evolution of mobile fold-and-thrust belts at the boundaries of ancient cratons, but also for solving the problem of the possible incorporation of the Siberian Craton into the Rodinia supercontinent, an issue that has been debated for more than 20 years. Based on the results of mineralogical-petrological, geochemical and isotope-geochronological studies, new data were obtained on the major- and trace-element composition, petrogenesis, zircon U-Pb age, Sr and ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd isotopic parameters for rocks of the Ryazanovsky granitoid massif located near the Yenisei fault zone of the Yenisei Range. These rocks are represented by high-ferruginous peraluminous varieties and are comparable to A-granites or highly differentiated I-granites. Their composition evolves from normal to subalkaline granites and leucogranites, characterized by increased concentrations of highly charged and radioactive elements. Isotopic (Sr, Nd) characteristics of the rocks indicate generation from an ancient crustal substrate, the average age of which corresponds to the Paleoproterozoic. The formation of these granites at the Meso-Neoproterozoic boundary (1013 ± 9.9 Ma) corresponds to the early stage of the Grenville orogeny at the western margin of the Siberian Craton. This episode of regional crustal evolution is correlated with the synchronous successions and similar style of tectonothermal events along the Arctic margin of Rodinia and supports the spatial proximity of Siberia and North Atlantic cratons (Laurentia and Baltica), which is consistent with the proposed Neoproterozoic paleogeographic reconstructions of the Rodinia configuration. New evidence of Grenville-age collision events, combined with other age equivalents within the western margin of the Siberian Craton, helps resolve a number of controversies in the interpretation of key issues in the geology and tectonics of this region.

Keywords: granitoids; rock geochemistry; U-Pb dating; Sr and ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd isotope systematics; Grenville orogeny; Yenisei Range

For citation: Nozhkin A. D., Turkina O. M., Likhanov I. I., Ronkin Yu. L. Evidence of Grenville age events at the western margin of the Siberian Craton: the case of Ryazanovsky granitoid massif (Yenisei Range). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 114–118. doi: 10.17076/geo2175

Funding. The study was funded within Russian Science Foundation project #21-77-20018-П.

На основании имеющихся в литературе представлений о низкой эндогенной активности в геологической эволюции Земли в интервале между 1,8 и 0,75 млрд лет, известных как скучный миллиард, в ряде работ был сделан вывод об отсутствии на Енисейском кряже (ЕК) коллизионных событий гренвильского возраста, заключительные стадии деформации которого имели возраст 1,2–0,9 млрд лет [Богданова и др., 2009]. Это привело к противоречивой трактовке вопросов геологической эволюции региона. Очевидно, что такое представление связано с дефицитом геохимических данных и

возрастных датировок, ограничивающих возможности временных корреляций глобальных геологических процессов в истории Земли. Попытка восполнения этого пробела предпринята в настоящей работе, в которой обсуждаются особенности происхождения пород Рязановского массива и геохронологические свидетельства ранненеопротерозойских событий в эволюции ЕК.

По своему петрохимическому составу этот массив, расположенный в нижнем течении р. Кия (правый приток р. Енисей), имеет все признаки натрий-калиевых геохимически

дифференцированных гранитных массивов, состав которых эволюционирует от гранитов до субщелочных гранитов и лейкогранитов. Обогащение гранитов высокозарядными элементами и Th сближает их с гранитами А-типа, что могло произойти в результате плавления корового кварц-полевошпатового источника при высокой температуре с полным растворением акцессорных элементов в магмообразующем субстрате. При последующей дифференциации расплава, вероятно, также происходило накопление некогерентных редких элементов.

Графическая интерпретация U-Pb LA-ICP-MS-конкордантных данных для 12 кристаллов циркона, отобранных из субщелочного лейкогранита ($1011,4 \pm 7,9$ млн лет), результаты вычисления средневзвешенных значений конкордантных U-Pb-возрастов с помощью четырех алгоритмов (по более статистически представленному количеству кристаллов $n = 18$), показывают U-Pb-возраст $1013,0 \pm 9,9$ млн лет, который может быть принят в качестве наилучшей оценки времени формирования гранитов Рязановского массива (рис. 1).

Рассмотрение Rb-Sr ID-TIMS-изотопной сигнатуры этих образцов на графике Николайсена в координатах $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ выявляет эволюционную зависимость с наклоном, равным

$\exp(\lambda_{87} \cdot t) - 1 = 0,01562$, где $\lambda_{87} = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$ – постоянная распада ^{87}Rb , соответствующим возрасту 1091 ± 55 млн лет. На этом же графике представлена линия согласования с U-Pb LA-ICP-MS-возрастом $t = 1013$ млн лет и наклоном, равным $\exp(\lambda_{87} \cdot t) - 1 = 0,01449$. Относительно высокое значение первичного изотопного отношения $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0,7124 \pm 0,0036$ свидетельствует о существенной роли корового компонента в формировании расплава, что находит свое подтверждение и в величинах $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$, равных 5,0–4,8 для гранитов исследуемых образцов.

Концентрации Sm и Nd в исследованных образцах гранитов ограничены интервалом 5,3–6,8 и 31–40 г/т, при этом вариации величин $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ и $^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ составляют всего лишь 1,6 и 0,003 %, что в конечном итоге определяет близость T_{DM} 1902 и 1910 млн лет соответственно. Вычисленные с учетом $t_{\text{U-Pb}}$ (1013 млн лет) двухстадийные оценки модельного возраста также практически совпадают (2069 и 2057 млн лет) (рис. 2). Поскольку U-Pb-возраст гранитов Рязановского массива значительно меньше Nd-модельных датировок, последние следует интерпретировать «усредненным» смешанным источником, имеющим как минимум раннепротерозойский возраст.

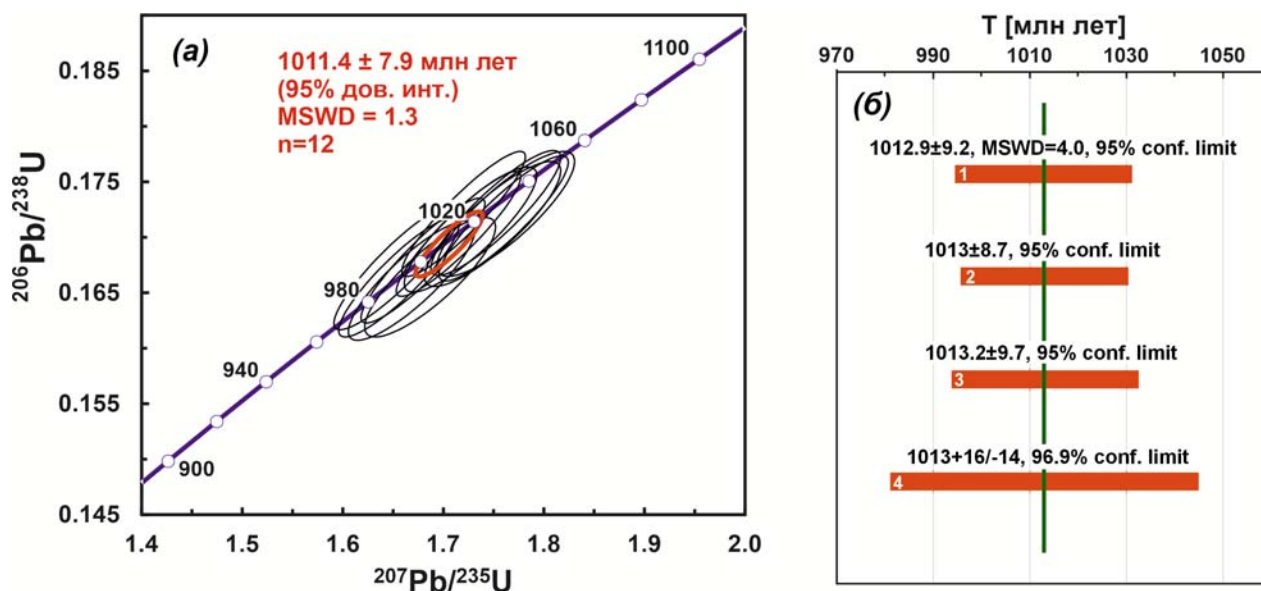


Рис. 1. Графическая интерпретация U-Pb LA-ICP-MS-данных для циркона из гранитов Рязановского массива (обр. А-314-83):

а) U-Pb-график с конкордией, без учета неопределенностей константы распада ($n = 12$); б) U-Pb-конкордантный возраст $1013,0 \pm 9,9$ [0,97 %] 95% conf. lim., MSWD = 0,00017

Fig. 1. Graphic interpretation of U-Pb LA-ICP-MS-data for zircon from granites of the Ryazanovsky massif (sample A-314-83):

а) U-Pb plot with concordia, without taking into account the uncertainties of the decay constant ($n = 12$); б) U-Pb concordant age $1013,0 \pm 9,9$ [0,97 %] 95% conf. lim., MSWD = 0,00017

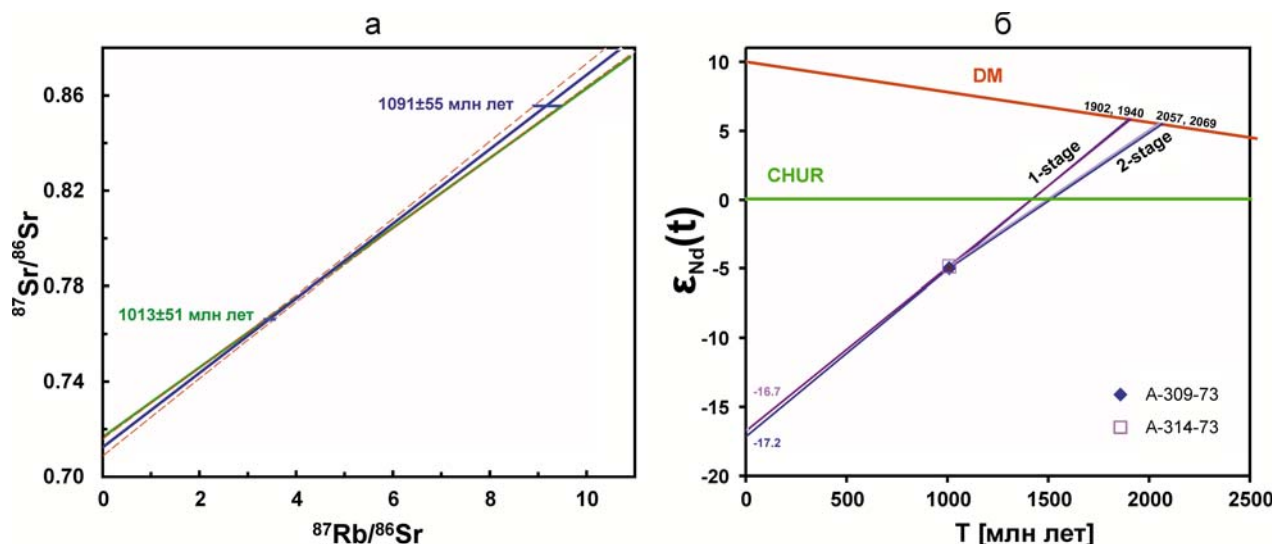


Рис. 2. (а) Rb-Sr-эволюционная диаграмма (синим цветом) и (б) эволюция ^{147}Sm - ^{143}Nd -изотопной системы для гранитов А-309-73 и А-314-73 Рязановского массива. 1-stage, 2-stage, 1902, 1940, 2057, 2069 – линии эволюции по одностадийной и двухстадийной Nd-модели и соответствующие возрасты (в млн лет)

Fig. 2. (a) Rb-Sr evolution diagram (blue) and (б) evolution of the ^{147}Sm - ^{143}Nd isotope system for granites A-309-73 and A-314-73 of the Ryazanovsky massif. 1-stage, 2-stage, 1902, 1940, 2057, 2069 – evolutionary lines according to the one-stage and two-stage Nd model and the corresponding ages (in Ma)

Становление гранитоидов Рязановского массива на рубеже мезо- и неопротерозоя ($1013 \pm 9,9$ млн лет) отвечает раннему этапу орогенеза гренвилльского возраста на юго-западе Сибирского кратона. В пределах ЕК в качестве возрастных аналогов процессов гренвилльской складчатости также рассматриваются гранитогнейсовые купола, гранитоиды Гаревского комплекса, метапелиты низких/умеренных давлений и тектониты Северо- и Южно-Енисейского кряжа, а также метабазиты Рыбинско-Панинбинского вулканического пояса [Likhanov et al., 2004; Лиханов и др., 2011, 2014; Reverdatto et al., 2019; Лиханов, 2020, 2023; Likhanov, 2022].

Геодинамическая история региона сопоставляется с синхронной последовательностью и схожим стилем тектоно-термальных событий по периферии крупных докембрийских кратонов Лаврентии и Балтики, что подтверждает палеоконтинентальные реконструкции о вхождении Сибирского кратона в состав ядра суперконтинента Родинии [Torsvik, 2003; Li et al., 2023]. Представленные свидетельства позволяют разрешить ряд противоречий в трактовке ключевых вопросов геологии региона, например, ранние предположения об отсутствии на ЕК орогенных событий гренвилльского возраста.

Литература

- Богданова С. В., Писаревский С. А., Ли Ч. Х. Образование и распад Родинии (по результатам МПГК 440) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2009. Т. 17(3). С. 29–45.
- Лиханов И. И. Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // Петрология. 2020. Т. 28, № 1. С. 4–22. doi: 10.31857/S0869590320010045
- Лиханов И. И. Свидетельства гренвилльских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона (Гаревский метаморфический комплекс, Енисейский кряж) // Петрология. 2023. Т. 31(1). С. 49–80. doi: 10.1134/S0869591123010058
- Лиханов И. И., Reverdatto 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. doi: 10.1134/S1028334X11020048
- Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Reverdatto В. В., Козлов П. С. Гренвилльские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. 2014. Т. 48(5). С. 32–53. doi: 10.7868/S0016853X1405004X
- 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. Т. 55, № 1. С. 41–65. doi: 10.1134/S0016852121010076

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., 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. Vol. 22(8). P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Li Z.-X., Liu Y., Ernst R. A dynamic 2000–540 Ma Earth history: from cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle // *Earth-Sci. Rev.* 2023. Vol. 238. Art. 104336.

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

Torsvik T. H. The Rodinia jigsaw puzzle // *Science*. 2003. Vol. 300. P. 1379–1381.

References

Bogdanova S. V., Pisarevsky S. A., Li Z. X. Assembly and breakup of Rodinia (some results of IGCP Project 440). *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2009;17(3):259–274. doi: 10.1134/S0869593809030022

Likhanov I. I. Metamorphic indicators for collision, extension, and shear zone geodynamic settings of the Earth's crust. *Petrology*. 2020;28(1):1–16. doi: 10.1134/S086959112001004X

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. Grenville and Valhalla tectonic events at the Western margin of the Siberian Craton: evidence from rocks of the Garevka Complex, Northern Yenisei Range, Russia. *Petrology*. 2023;30:S72–S100. doi: 10.1134/S0869591123010058

Likhanov I. I., Nozhkin A. D., Reverdatto V. V., Kozlov P. S. Grenville tectonic events and evolution of the Yenisei Ridge at the Western margin of the Siberian Craton. *Geotectonics*. 2014;48(5):371–389. doi: 10.1134/S0016852114050045

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., 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

Li Z.-X., Liu Y., Ernst R. A dynamic 2000–540 Ma Earth history: from cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle. *Earth-Sci. Rev.* 2023;238:104336.

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

Torsvik T. H. The Rodinia jigsaw puzzle. *Science*. 2003;300:1379–1381.

Поступила в редакцию / received: 31.07.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ножкин Александр Дмитриевич

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

Туркина Ольга Михайловна

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

Лиханов Игорь Иванович

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

Ронкин Юрий Лазаревич

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

CONTRIBUTORS:

Nozhkin, Alexander

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

Turkina, Olga

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

Likhanov, Igor

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

Ronkin, Yuri

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