

Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр  
Российской академии наук»

# **ТРУДЫ**

## **КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

№ 5, 2022

ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

Петрозаводск  
2022

Главный редактор

А. Ф. ТИТОВ, член-корр. РАН, д. б. н., проф.

Редакционный совет

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; О. Н. БАХМЕТ (зам. главного редактора), член-корр. РАН, д. б. н.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; И. В. ДРОБЫШЕВ, доктор биологии (Швеция – Канада); Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; Х. ЙООСТЕН, доктор биологии, проф. (Германия); А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; Н. В. ЛУКИНА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; О. ОВАСКАЙНЕН, доктор математики, проф. (Финляндия); О. Н. ПУГАЧЕВ, академик РАН, д. б. н.; С. А. СУББОТИН, доктор биологии (США); Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; Т. Э. ХАНГ, доктор географии (Эстония); П. ХЁЛЬТТЯ, доктор геологии, проф. (Финляндия); К. ШАЕВСКИЙ, доктор математики, проф. (Польша); В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Редакционная коллегия тематического выпуска серии «Геология докембрия»

В. В. БАЛАГАНСКИЙ, д. г.-м. н.; Ш. К. БАЛТЫБАЕВ, д. г.-м. н.; Н. А. БОЖКО, д. г.-м. н., проф.; С. В. ВЫСОЦКИЙ, д. г.-м. н.; Т. В. ДОНСКАЯ, д. г.-м. н.; Н. В. ЛУБНИНА, д. г.-м. н., проф.; К. А. САВКО, д. г.-м. н., проф.; А. В. САМСОНОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н.; С. А. СВЕТОВ, д. г.-м. н., проф.; Н. С. НЕСТЕРОВА (отв. секретарь), к. г.-м. н.; А. И. СЛАБУНОВ, д. г.-м. н. (отв. редактор); А. В. СТЕПАНОВА, к. г.-м. н.; О. М. ТУРКИНА, д. г.-м. н.; А. А. ЩИПАНСКИЙ, д. г.-м. н.

*Издается с января 2009 г.*

Адрес редакции: 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11  
Тел. (8142)762018; факс (8142)769600  
E-mail: [trudy@krc.karelia.ru](mailto:trudy@krc.karelia.ru)

Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

# **TRANSACTIONS**

**of the KARELIAN RESEARCH CENTRE  
of the RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES**

No. 5, 2022

PRECAMBRIAN GEOLOGY

Petrozavodsk  
2022

Editor-in-Chief

A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); I. V. DROBYSHEV, PhD (Biol.) (Sweden – Canada); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; T. E. HANG, PhD (Geog.) (Estonia); P. HÖLTTÄ, PhD (Geol.), Prof. (Finland); E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; H. JOOSTEN, Dr. (Biol.), Prof. (Germany); A. M. KRYSHEN', DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); N. V. LUKINA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; O. OVASKAINEN, PhD (Math.), Prof. (Finland); O. N. PUGACHYOV, RAS Academician, DSc (Biol.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SUBBOTIN, PhD (Biol.) (USA); D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); K. SZAJEWSKI, PhD (Math.), Prof. (Poland); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the Thematic issue of the «Precambrian Geology» Series

V. V. BALAGANSKY, DSc (Geol.-Miner.); Sh. K. BALTIBAEV, DSc (Geol.-Miner.); N. A. BOZHKO, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. V. VYSOTSKIY, DSc (Geol.-Miner.); T. V. DONSKAYA, DSc (Geol.-Miner.); N. V. LUBNINA, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; K. A. SAVKO, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; A. V. SAMSONOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geol.-Miner.); S. A. SVETOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; N. S. NESTEROVA (Executive Secretary), PhD (Geol.-Miner.); A. I. SLABUNOV, DSc (Geol.-Miner.) (Editor-in-Charge); A. V. STEPANOVA, PhD (Geol.-Miner.); O. M. TURKINA, DSc (Geol.-Miner.); A. A. SHCHIPANSKY, DSc (Geol.-Miner.)

*Published since January 2009*

*8 issues a year*

Editorial Office address: 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
Tel. (8142)762018; fax (8142)769600  
E-mail: [trudy@krc.karelia.ru](mailto:trudy@krc.karelia.ru)  
Full-text electronic version: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

## От редактора

Уважаемые коллеги!

Тематический выпуск серии «Геология докембрия» состоит из кратких сообщений, подготовленных участниками всероссийской (с участием зарубежных ученых) научной конференции «Геология и геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем» (Early Precambrian vs Modern Geodynamics) – седьмой в цикле форумов, которые регулярно организует Институт геологии КарНЦ РАН. Главная идея этой конференции, как и всего цикла, заключается в поиске наиболее перспективных путей познания ранней истории Земли. Исходя из этого, главные темы, которым посвящены работы настоящего выпуска, следующие: 1) геология и геодинамика раннего докембрия: сходство и различия с современными геодинамическими процессами; 2) сравнительный анализ геологии и геодинамики архея и протерозоя; 3) суперконтинентальная цикличность и геодинамика; 4) магматические и метаморфические процессы – индикаторы геодинамических обстановок; 5) эволюция ранней жизни и ее влияние на процессы рудообразования. Работы содержат данные по геологии фундамента Восточно-Европейского, Сибирского и Антарктического кратонов, Уральского и Альпийско-Гималайского орогенов и представляют интерес для геологов, занимающихся проблемами докембрия, а также для ученых, анализирующих эволюцию Земли в целом.

*А. И. Слабунов*

УДК 552.42 (99)

## **ЭВОЛЮЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ГРАНУЛИТОВ ОАЗИСА БАНГЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА, КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ИХ ФОРМИРОВАНИЯ**

**И. А. Абдрахманов<sup>1\*</sup>, Ю. Л. Гульбин<sup>2</sup>, И. М. Гембицкая<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И. С. Грамберга (Английский проспект, 1, Санкт-Петербург, Россия, 190121), \*ilnur\_01\_95@mail.ru*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский горный университет (21-я линия В.О., 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106)*

Рассмотрены закономерности эволюции вещественного состава метапелитовых гранулитов. На основе данных минеральной термобарометрии, физико-химического моделирования и изотопного датирования парагенезисов выделено два этапа мезопротерозойского метаморфизма. Показано, что более ранний этап характеризовался сверхвысокими (> 900 °С) пиковыми температурами и был связан с коллизионным событием в ходе формирования суперконтинента Родиния. Второй этап протекал в условиях амфиболитовой фации в обстановке постколлизионного растяжения орогена.

Ключевые слова: метапелитовые гранулиты; геотермобарометрия; изохимические диаграммы; УНТ метаморфизм; оазис Бангера; Восточная Антарктида

Для цитирования: Абдрахманов И. А., Гульбин Ю. Л., Гембицкая И. М. Эволюция минерального состава гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида, как отражение геодинамических обстановок их формирования // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 6–9. doi: 10.17076/geo1675

## **I. A. Abdrakhmanov<sup>1\*</sup>, Yu. L. Gulbin<sup>2</sup>, I. M. Gembitskaya<sup>2</sup>. EVOLUTION OF MINERAL ASSEMBLAGES IN GRANULITES FROM BUNGER HILLS, EAST ANTARCTICA, AS A RESULT OF THEIR GEODYNAMIC SETTINGS**

<sup>1</sup> *VNIIOkeangeologia (1 Angliiskiy Ave., St. Petersburg, Russia), \*ilnur\_01\_95@mail.ru*

<sup>2</sup> *Saint Petersburg Mining University (21st Line V.O., St. Petersburg, Russia)*

The paper discusses the mineral composition of metapelitic granulites. Two phases of Mesoproterozoic metamorphism are suggested from mineral thermobarometry, isochemical phase diagram modeling, and geochronology. It is shown that the early metamorphism was of ultra-high temperature (UHT) grade and associated with collisional tectonics during the Rodinia supercontinent amalgamation. The later metamorphism was amphibolite-facies and took place in a post-collisional extensional tectonic regime.

Keywords: metapelitic granulite; geothermobarometry; isochemical phase diagram; UHT metamorphism; Bunger Hills; East Antarctica

For citation: Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L., Gembitskaya I. M. Evolution of mineral assemblages in granulites from Bunger Hills, East Antarctica, as a result of their geodynamic settings. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:6–9. doi: 10.17076/geo1675

**Геология.** Комплекс магматических и метаморфических пород оазиса Бангера (западная часть Земли Уилкса) является частью Восточно-Антарктического щита. В рамках геодинамической реконструкции Австрало-Антарктического сегмента Гондваны эта область рассматривается как юго-западная оконечность мезопротерозойского складчатого пояса Олбани-Фрейзер [Tucker et al., 2018]. По данным российских и австралийских геологов [Равич и др., 1965; Sheraton et al., 1995], территория оазиса сложена в южной части крупными телами неоархейских тоналит-гранитовых ортогнейсов (~2800–2700 млн лет), в северной – вулканогенно-осадочной толщей палеопротерозойского возраста (1900–1650 млн лет), смятой в изоклинальные складки и метаморфизованной в условиях гранулитовой фации. В составе толщи преобладают интенсивно мигматизированные парагнейсы (метапелитовые гранулиты); подчиненное значение имеют амфибол-биотит-пироксеновые сланцы и гнейсы (основные гранулиты). Толща прорвана крупными телами синколлизонных чарнокитоидов с возрастом 1170–1150 млн лет.

**Петрография.** Метапелитовые гранулиты сложены преобладающими Grt+Sil ( $\pm$ Crd), Grt+Crd и Grt+Opx ( $\pm$ Crd) парагенезисами. Гранат (Prp 30–40 %) образует относительно крупные гранобласты (сокращения минералов по: [Kretz, 1983]). Более мелкие зерна силлиманита и кордиерита (Mg# 78–89) формируют линзовидные агрегаты, в интерстициях которых располагаются выделения ильменита и алюмошпинелей, включая низкоцинкистый (ZnO 1–3 мас. %) герцинит (Spl 17–52 %). Силлиманит представлен тремя генерациями, которые наблюдаются в виде включений в гранате (Sil<sub>1</sub>), призматических кристаллов в матриксе (Sil<sub>2</sub>) и тонкоигольчатых агрегатов, замещающих кордиерит вдоль межзеренных границ (Sil<sub>3</sub>). Характерным минералом Grt-Sil гранулитов выступает рутил. Ортопироксен (En 56–61 %) обогащен алюминием (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 7–9 мас. %, Al<sup>M1</sup> до 0,19–0,20 к.ф.). С перечисленными минералами ассоциируют умеренно-кислый плагиоклаз с антипертитами и мезопертит;

ксеноморфные выделения полевых шпатов интерпретируются как признак частичного плавления парагнейсов. В ограниченном количестве присутствует высокотитанистый (TiO<sub>2</sub> 3–5 мас. %) биотит (Mg# 65–84), образующий включения в гранате (Bt<sub>1</sub>), пластинчатые кристаллы в матриксе (Bt<sub>2</sub>) и совместно с кварцем входящий в состав симплектитов, замещающих гранат и ортопироксен (Bt<sub>3</sub>).

**Термобарометрия.** Особенности вещественного состава гранулитов указывают на сверхвысокие (> 900 °C) пиковые температуры их образования. Минеральными индикаторами УHT метаморфизма выступают: (а) парагенезис шпинели с кварцем [Harley, 2008]; (б) высокое содержание элементов-примесей в кварце (Al 20–175 ppm, Fe 35–1260 ppm, Ti 150–280 ppm). Согласно показаниям «Ti-в-кварце» геотермобарометра [Huang, Audéat, 2012], для давления 6–7 кбар температура кристаллизации этого минерала могла достигать 980–1000 °C. С распадом высокотемпературного твердого раствора кварца связано появление в кварцевых зернах игловидных микровключений рутила и герцинита [Гульбин и др., 2022]; (в) высокое содержание глинозема в ортопироксене. По данным Grt-Opx термобарометрии [Harley, Green, 1982], два минерала были уравновешены в интервале температур 910–970 °C и давлений 5–7 кбар; (г) широкое развитие в гранулитах закономерных сростков Ilm-Crn-Mag, Ilm-Crn-Ti-Mag-Usp-Rt, Ilm-Rt-Ghn состава, образование которых связано с распадом высокотемпературных твердых растворов. В их числе – пластинчатых сростков ильменита и титансодержащего магнетита с необычно высоким содержанием ульвошпинелевого минала (до 55–78 мол. %), возникших в результате распада твердого раствора Ti-Mag<sub>ss</sub> при температуре, возможно, превышавшей 1100 °C [Абдрахманов и др., 2021].

**Эволюция метаморфизма.** Результаты моделирования минеральных парагенезисов (метод изохимических диаграмм, программа Theriak/Domino) в сочетании с данными «Ti-в-биотите» геотермометрии [Henry et al., 2005] позволяют оценить P-T параметры образования раннего парагенезиса (Grt+Sil<sub>1</sub>+Bt<sub>1</sub>)

значениями 6–7 кбар, 760–830 °С. В ходе проградного метаморфизма давление оставалось примерно постоянным или (в случае рутилсодержащих ассоциаций) возрастало до 8–10 кбар. Пиковые парагенезисы (Grt + Sil<sub>2</sub> + Spl, Grt + Crd + Spl, Grt + Оpx + Crd + Spl) формировались в субсолидусной и гиперсолидусной области (6–7 кбар, >950 °С). Стабилизации шпинели способствовало снижение активности воды в системе, вызванное частичным плавлением парагнейсов. На ретроградной стадии имело место изобарическое (при давлении ~ 5 кбар) охлаждение до температуры 850–900 °С, приведшее к частичному перераспределению фемических компонентов между сосуществующими минералами. Последующий рост литостатического и водного давления (до ~ 6 кбар при температуре около 750 °С) стал причиной появления в составе гранулитов позднего парагенезиса (Sil<sub>3</sub> + Bt<sub>2-3</sub>).

**Геодинамическая интерпретация.** По данным LA-ICP-MS U-Pb датирования циркона и монацита из парагнейсов [Tucker et al., 2018], возраст последнего «омоложен» в сравнении с возрастом циркона. Результаты датирования ограничивают временной интервал гранулитового метаморфизма значениями 1220–1180 млн лет, «постпиковых» изменений пород – значениями 1180–1100 млн лет. Результаты наших исследований позволяют интерпретировать эти данные как свидетельство двух этапов метаморфизма. Более ранний «гранулитовый» этап характеризовался закрученной по часовой стрелке «декомпрессионной» P-T траекторией и был связан с одним из коллизионных событий, сопровождавших формирование суперконтинента Родиния. Более поздний «амфиболитовый» этап проявился в обстановке постколлизионного растяжения, вызванной коллапсом орогена, и протекал в условиях роста давления как результата утолщения земной коры за счет интенсивного гранитоидного магматизма.

## Литература

- Абдрахманов И. А., Гульбин Ю. Л., Гембицкая И. М. Ассоциация Fe–Mg–Al–Ti–Zn оксидов в гранулитах оазиса Бангера, Восточная Антарктида: свидетельства метаморфизма сверхвысоких температур // Записки РМО. 2021. Т. 150, № 4. С. 38–76. doi: 10.31857/S086960552104002X
- Гульбин Ю. Л., Абдрахманов И. А., Гембицкая И. М., Васильев Е. А. Ориентированные микровключения оксидов системы Al–Fe–Mg–Ti в кварце из метапелитовых гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида // Записки РМО. 2022. Т. 151, № 4. С. 1–18. doi: 10.31857/S0869605522040037

- Равич М. Г., Климов Л. В., Соловьев Д. С. Докембрий Восточной Антарктиды. М.: Недра, 1965. 470 с.
- Harley S. L. Refining the P-T records of UHT crustal metamorphism // *J. Metamorph. Geol.* 2008. Vol. 26. P. 125–154. doi: 10.1111/j.1525-1314.2008.00765.x
- Harley S. L., Green D. H. Garnet-orthopyroxene barometry for granulites and peridotites // *Nature.* 1982. Vol. 300. P. 697–701. doi: 10.1038/300697A0
- Henry D. J., Guidotti C. V., Thompson J. A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms // *Amer. Miner.* 2005. Vol. 90. P. 316–328. doi: 10.2138/am.2005.1498
- Huang R., Audétat A. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer: A critical examination and re-calibration // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012. Vol. 84. P. 75–89. doi: 10.1016/j.gca.2012.01.009
- Kretz R. Symbols for rock-forming mineral // *Amer. Miner.* 1983. Vol. 68. P. 277–279.
- Sheraton J. W., Tingey R. J., Oliver R. L., Black L. P. Geology of the Bunger Hills-Denman Glacier region, East Antarctica // *AGSO Bull.* 1995. No. 244. 136 p.
- Tucker N. M., Hand M., Kelsey D. E., Taylor R., Clark C., Paynee J. L. A tripartite approach to unearthing the duration of high temperature conditions versus peak metamorphism: An example from the Bunger Hills, East Antarctica // *Precambrian Res.* 2018. Vol. 314. P. 194–220. doi: 10.1016/j.precamres.2018.06.006

## References

- Abdrakhmanov I. A., Gulbin Yu. L., Gembitskaya I. M. Fe–Mg–Al–Ti–Zn oxide assemblage in granulites of the Bunger Hills, East Antarctica: evidence of ultrahigh-temperature metamorphism. *Zapiski RMO = Proceedings of the RMS.* 2021;150(4):38–76. doi: 10.31857/S086960552104002X (In Russ.)
- Gulbin Yu. L., Abdrakhmanov I. A., Gembitskaya I. M., Vasilev E. A. Oriented microinclusions of oxides of the Al–Fe–Mg–Ti system in quartz from metapelitic granulites of the Bunger Hills, East Antarctica. *Zapiski RMO = Proceedings of the RMS.* 2022;151(4):1–18. doi: 10.31857/S0869605522040037 (In Russ.)
- Harley S. L. Refining the P-T records of UHT crustal metamorphism. *J. Metamorph. Geol.* 2008;26:125–154. doi: 10.1111/j.1525-1314.2008.00765.x
- Harley S. L., Green D. H. Garnet-orthopyroxene barometry for granulites and peridotites. *Nature.* 1982;300:697–701. doi: 10.1038/300697A0
- Henry D. J., Guidotti C. V., Thompson J. A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *Amer. Miner.* 2005;90:316–328. doi: 10.2138/am.2005.1498
- Huang R., Audétat A. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer: A critical examination and re-calibration. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2012;84:75–89. doi: 10.1016/j.gca.2012.01.009
- Kretz R. Symbols for rock-forming mineral. *Amer. Miner.* 1983;68:277–279.
- Sheraton J. W., Tingey R. J., Oliver R. L., Black L. P. Geology of the Bunger Hills-Denman Glacier region, East Antarctica. *AGSO Bull.* 1995;244. 136 p.



*Ravich M. G., Klimov L. V., Solov'ev D. S.* Precambrian East Antarctica. Moscow: Nedra; 1965. 470 p. (In Russ.)  
*Tucker N. M., Hand M., Kelsey D. E., Taylor R., Clark C., Payne J. L.* A tripartite approach to unear-

thing the duration of high temperature conditions versus peak metamorphism: An example from the Bunge Hills, East Antarctica. *Precambrian Res.* 2018;314:194–220. doi: 10.1016/j.precamres.2018.06.006

*Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.*  
*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

##### **Абдрахманов Ильнур Альбертович**

ведущий инженер отдела геологии и минеральных ресурсов Антарктики

*e-mail: ilnur\_01\_95@mail.ru*

##### **Гульбин Юрий Леонидович**

д-р геол.-мин. наук, доцент, заведующий кафедрой минералогии, кристаллографии и петрографии

*e-mail: ygulbin@yandex.ru*

##### **Гембицкая Ирина Михайловна**

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

*e-mail: gembitskaia\_im@pers.spmi.ru*

#### **CONTRIBUTORS:**

##### **Abdrakhmanov, Ilnur**

Leading Engineer

##### **Gulbin, Yuri**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor,  
Head of Department

##### **Gembitskaya, Irina**

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

УДК 552.4

## ПРОИСХОЖДЕНИЕ «ХОЛОДНЫХ» (НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ) ГРАНУЛИТОВ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА: РОЛЬ УГЛЕКИСЛОТНОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО ФЛЮИДА

П. Я. Азимов

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034)*

В Беломорском подвижном поясе среди метаморфических пород амфиболитовой фации присутствуют отдельные проявления гранулитовых парагенезисов. Термобарометрические расчеты показывают, что в основных породах гранулитовые парагенезисы со скаполитом в некоторых случаях формируются в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации повышенных давлений под воздействием богатого углекислотой флюида с низкой  $a_{H_2O}$ , просачивающегося через амфиболиты.

Ключевые слова: основные гранулиты; термобарометрия; метаморфический флюид; Беломорский подвижный пояс

Для цитирования: Азимов П. Я. Происхождение «холодных» (низкотемпературных) гранулитов Беломорского подвижного пояса: роль углекислотного метаморфического флюида // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 10–13. doi: 10.17076/geo1671

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГГД РАН FMUW-2022-0002.

### **P. Ya. Azimov. ORIGIN OF THE “COLD” (LOW-TEMPERATURE) GRANULITES IN THE BELOMORIAN MOBILE BELT: THE ROLE OF CARBON DIOXIDE IN METAMORPHIC FLUID**

*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)*

In the Belomorian mobile belt, manifestations of granulitic mineral assemblages occur among amphibolite-facies rocks. Thermobarometric calculations display that some granulitic scapolite-bearing assemblages in mafic rocks were formed during high-temperature, high-pressure amphibolite-facies metamorphism. These granulitic assemblages resulted from the infiltration of  $CO_2$ -rich fluid with low  $a_{H_2O}$  through amphibolites.

Keywords: mafic granulites; thermobarometry; metamorphic fluid; the Belomorian Mobile Belt

For citation: Azimov P. Ya. Origin of the “cold” (low-temperature) granulites in the Belomorian Mobile Belt: the role of carbon dioxide in metamorphic fluid. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:10–13. doi: 10.17076/geo1671

Funding. The study was funded within state-ordered research theme of the Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS FMUW-2022-0002.

В Беломорском подвижном поясе (Северо-Восточная Фенноскандия) интенсивно проявлен палеопротерозойский метаморфизм амфиболитовой фации, сопровождающийся мигматизацией [Слабунов и др., 2016]. Среди пород амфиболитовой фации отмечаются участки и тела, сложенные породами с гранулитовыми парагенезисами, в которых безводные Fe-Mg-минералы преобладают над водосодержащими. В породах основного состава это парагенезис  $Scpx + Grt + Pl \pm Qtz \pm Hbl, Bt, Scp$  (без  $Orx$ ), обычный для высокобарных гранулитов [O'Brien, Rötzler, 2003]. Некоторые

из пород с таким парагенезисом в Беломорье являются метагабброидами и сохраняют реликтовую габбровую структуру, часто с реакционными каймами [Stepanova et al., 2022]. Первичная природа других пород неочевидна. Логичное предположение, что гранат-клинопироксеновые парагенезисы сформированы в условиях гранулитовой фации, не всегда оказывается верным. Термобарометрические расчеты показывают, что некоторые из них образованы в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации повышенных давлений.



Прожилки крупнозернистого  $Scp-Grt-Cpx$ -гранулита в черном  $Grt$ -амфиболите. Белые прожилки – скаполит. Окрестности пос. Амбарный; центральная часть Беломорского подвижного пояса

Veins of the large-grained  $Scp-Grt-Cpx$  granulite in black garnetiferous amphibolite. White veinlets are composed of scapolite. Vicinities of the Ambarny village; the central part of the Belomorian Mobile Belt

Такие низкотемпературные гранулиты установлены, в частности, в центральной части Беломорского пояса, в окрестностях поселка Амбарный. Здесь в черных гранатовых амфиболитах хетоламбинской толщи встречаются крупнозернистые зеленоватые прожилки с минеральной ассоциацией  $\text{Cpx} + \text{Grt} + \text{Hbl} + \text{Scp} + \text{Qtz} \pm \text{Pl} \pm \text{Cal} \pm \text{Czo}$ , ориентированные вдоль сланцеватости амфиболита (рис.). Скаполит, в свою очередь, образует белые прожилки в клинопироксеновой породе, которые можно принять за жилки лейкосомы. Этот скаполит содержит только карбонат-анион, без хлора и сульфата. Хлор отсутствует и в амфиболе. Петрографические исследования прожилков показывают, что новообразованная гранулитовая ассоциация замещает обычный амфиболитовый парагенезис  $\text{Hbl} + \text{Pl} + \text{Qtz} + \text{Grt}$ . Реликты раннего парагенезиса сохраняются, в частности, в виде включений в порфиробластах граната.

Термобарометрические расчеты, выполненные методом TWEEQU [Berman, 1991], свидетельствуют, что и амфиболитовый, и гранулитовый парагенезисы образовались в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации повышенных давлений (полученные РТ-значения: для амфиболитового парагенезиса – 7–9 кбар и 650–700 °С, для гранулитового – 7–10 кбар и 650–730 °С; эти величины практически совпадают с учетом разброса рассчитанных значений). Очевидно, что в данном случае образование гранулитов вызвано не ростом температуры, а снижением активности воды во флюиде, приводящим к расширению поля устойчивости гранулитового парагенезиса в область более низких температур и к замещению водосодержащего минерала (Hbl) безводными (Cpx и Grt). Падение активности воды, в свою очередь, вызвано ростом содержания  $\text{CO}_2$  во флюиде. Углекислота фиксируется в породе в скаполите и кальците. Прожилковый характер выделений нового парагенезиса подтверждает роль флюидных потоков в его формировании.

Наблюдаемый процесс в целом схож, видимо, с формированием гранулитовых парагенезисов в палеоархейских биотит-роговообманковых гнейсах Сэнд Ривер (пояс Лимпопо, Южная Африка) при дегидратации под действием углекислотно-солевого флюида [Rajesh et al., 2013]. Механизм этого процесса был подтвержден экспериментальными исследованиями О. Г. Сафонова с соавторами [Safonov et al., 2014]. Однако в отличие от гранулитов Сэнд Ривер во время образования беломорских «дегидратационных» гранулитов воздействовавший на породу флюид не содержал солевой

нагрузки, на что указывает отсутствие хлора в роговой обманке и скаполите.

Таким образом, появление и устойчивость высокобарного гранулитового парагенезиса в условиях амфиболитовой фации повышенных давлений может определяться притоком богатого углекислотой метаморфического флюида, просачивающегося через породы в зоне рассланцевания. В то же время в Беломорском подвижном поясе широко распространены и «высокотемпературные» гранулитовые парагенезисы, возникшие при высокобарном гранулитовом метаморфизме.

## Литература

- Слабунов А. И., Азимов П. Я., Глебовицкий В. А., Жанг Л., Кевлич В. И. Архейская и палеопротерозойская мигматизация пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия // ДАН. 2016. Т. 467, № 1. С. 71–74. doi: 10.7868/S0869565216070239
- Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications // *Can. Mineral.* 1991. Vol. 29. P. 833–855.
- O'Brien P. J., Rötzler J. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics // *J. Metamorphic Geol.* 2003. Vol. 21, no. 1. P. 3–20. doi: 10.1046/j.1525-1314.2003.00420.x
- Rajesh H. M., Belyanin G. A., Safonov O. G., Kovaleva E. I., Golunova M. A., Van Reenen D. D. Fluid-induced dehydration of the Paleoproterozoic Sand River biotite-hornblende gneiss, Central Zone, Limpopo Complex, South Africa // *J. Petrol.* 2013. Vol. 54, no. 1. P. 41–74. doi: 10.1093/petrology/egs062
- Safonov O. G., Kosova S. A., Van Reenen D. D. Interaction of biotite-amphibole gneiss with  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-(\text{K}, \text{Na})\text{Cl}$  fluids at 550 MPa and 750 and 800 °C: Experimental study and applications to dehydration and partial melting in the middle crust // *J. Petrol.* 2014. Vol. 55, no. 12. P. 2419–2456. doi: 10.1093/petrology/egu062
- Stepanova A. V., Stepanov V. S., Larionov A. N., Kervinen A. V., Maksimov O. A., Larionov A. N., Salnikova E. B., Azimov P., Sukhanova M. A., Samsonov A. V., Babarina I. I., Larionova Y. O. Relicts of Paleoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen // *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 2022. Vol. 518. P. 101–128. doi: 10.1144/SP518-2021-30
- References**
- Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications. *Can. Mineral.* 1991;29:833–855.
- O'Brien P. J., Rötzler J. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. *J. Metamorphic Geol.* 2003;21(1):3–20. doi: 10.1046/j.1525-1314.2003.00420.x
- Rajesh H. M., Belyanin G. A., Safonov O. G., Kovaleva E. I., Golunova M. A., Van Reenen D. D. Fluid-induced

dehydration of the Paleoproterozoic Sand River biotite-hornblende gneiss, Central Zone, Limpopo Complex, South Africa. *J. Petrol.* 2013;54(1):41–74. doi: 10.1093/ptrology/egs062

Safonov O. G., Kosova S. A., Van Reenen D. D. Interaction of biotite-amphibole gneiss with H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub>–(K, Na)Cl fluids at 550 MPa and 750 and 800°C: Experimental study and applications to dehydration and partial melting in the middle crust. *J. Petrol.* 2014;55(12):2419–2456. doi: 10.1093/ptrology/egu062

Slabunov A. I., Azimov P. Ya., Glebovitskii V. A., Zhang L., Kevlich V. I. Archean and Paleoproterozoic

migmatization in the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: petrology, geochronology and geodynamic setting. *Doklady Earth Sciences.* 2016;467(1):259–263. doi: 10.1134/S1028334X16030077

Stepanova A. V., Stepanov V. S., Larionov A. N., Kervinen A. V., Maksimov O. A., Larionov A. N., Salnikova E. B., Azimov P., Sukhanova M. A., Samsonov A. V., Babarina I. I., Larionova Y. O. Relicts of Paleoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 2022;518:101–128. doi: 10.1144/SP518-2021-30

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 24.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Азимов Павел Яковлевич**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

e-mail: pavel.azimov@mail.ru

#### **CONTRIBUTOR:**

**Azimov, Pavel**

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

УДК 553.061.12+551.243.6+551.72

## **ЭВОЛЮЦИЯ МАГМАТИЗМА ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО ПЕЧЕНГА-ВАРЗУГСКОГО РИФТА С ПОЗИЦИЙ НОВЫХ ДАННЫХ ПО НЕОГЕН-ЧЕТВЕРТИЧНЫМ РИФТОГЕННЫМ СТРУКТУРАМ ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ**

**А. А. Арзамасцев**

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034)*

Представлены результаты изучения эволюции магматизма неоген-четвертичных рифтогенных структур Восточно-Африканского рифта, позволяющие на основе сравнительного анализа скорректировать хроностратиграфические схемы корреляции палеопротерозойского Печенга-Варзугского рифта.

Ключевые слова: рифтогенез; магматизм; Печенга-Имандра-Варзугский рифт; Восточно-Африканский рифт

Для цитирования: Арзамасцев А. А. Эволюция магматизма палеопротерозойского Печенга-Варзугского рифта с позиций новых данных по неоген-четвертичным рифтогенным структурам Восточной Африки // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 14–17. doi: 10.17076/geo1674

### **A. A. Arzamastsev. EVOLUTION OF MAGMATISM IN THE PALEOPROTEROZOIC PECHENGA-VARZUGA RIFT IN LIGHT OF NEW DATA ON NEOGENE-QUATERNARY RIFT STRUCTURES OF EAST AFRICA**

*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)*

The paper presents the results of studies on the evolution of magmatism in the Neogene-Quaternary rift structures of the East African Rift, which lead to a revision, based on comparative analysis, of the chronostratigraphic correlation charts for the Paleoproterozoic Pechenga-Varzuga Rift.

Keywords: rift; magmatism; Pechenga-Imandra-Varzuga Rift; East African Rift

For citation: Arzamastsev A. A. Evolution of magmatism in the Paleoproterozoic Pechenga-Varzuga rift in light of new data on Neogene-Quaternary rift structures of East Africa. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:14–17. doi: 10.17076/geo1674

Печенга-Имандра-Варзугский пояс является примером внутриконтинентальной палеорифтогенной системы, которая за 600 млн лет прошла полный цикл развития: свободообразование, рифтогенез, орогенез и региональный метаморфизм [Смолькин, 1997]. Геохронологическим репером начала заложения этой структуры принято считать образование базитов горы Генеральской ( $2505 \pm 2$  млн лет) [Amelin et al., 1995], возраст завершающих магматических событий фиксируется в интервале 1,93–1,90 млрд лет назад. Выделенные уже на ранних этапах изучения пояса стратиграфические подразделения [Имандра-Варзугская..., 1982; Федотов, 1985; Предовский и др., 1987], объединяющие в основании каждой свиты осадочные образования, сменяющиеся вверх по разрезу вулканитами, являются подтверждением независимых циклов эндогенной активности. Ключевым элементом, свидетельствующим об автономности каждого цикла, является состав осадочных образований, слагающих основание каждой свиты. В частности, присутствие кор выветривания, а также базальных конгломератов в основании свит, терригенный характер осадков, закономерно сменяющихся все более глубоководными фациями, свидетельствуют о существовании нескольких периодов континентальных обстановок, разделенных эпизодами интенсивного магматизма. Единичные данные геохронологического датирования, полученные по отдельным субвулканическим образованиям разных уровней разреза, не позволяют с достаточной точностью определить возрастные рубежи формирования вулканогенно-осадочных толщ. Реконструкция трендов эволюции магматизма также осложнена отсутствием достаточного количества геохронологических данных, максимальная точность которых составляет в лучшем случае несколько миллионов лет. Еще более неопределенной является оценка соотношения возрастных интервалов осадконакопления и разделяющих их циклов магматической активности. В основу хроностратиграфических схем корреляции [Смолькин, 1997; Melezhik et al., 2012] положены оценки мощности, что подразумевает непрерывность формирования вулканогенно-осадочных комплексов в пределах каждого цикла и значительные по времени периоды магматической активности, сопоставимые по длительности с интервалами осадкообразования.

Накопленные в последние десятилетия данные об эволюции магматизма в фанерозойских и кайнозойских рифтогенных структурах позволяют с новых позиций оценить харак-

тер эволюции раннепротерозойского пояса Печенга-Имандра-Варзуга.

Идея прерывистости (punctuated) и малой длительности импульсов эндогенной активности, предложенная [Gould, Eldredge, 1993; Martin et al., 2012] в противовес концепции постепенной смены режимов осадкообразования и магматизма (gradualism), была проиллюстрирована на примере рифта Грегори [Dawson, 2008], располагающегося в восточной ветви Восточно-Африканской рифтогенной системы. Развитие этой гигантской структуры, начавшееся в зоне Афарского треугольника 45 млн лет назад, продолжается вплоть до настоящего времени [Rooney, 2020]. В пределах южного окончания восточной ветви, на границе с Танзанийским архейским кратоном, на относительно небольшой территории располагается область интенсивного магматизма, представленного крупными покровами базальтов нормального ряда, базанитами, щелочными вулканитами и малыми интрузивными телами. Согласно геохронологическим данным [Le Gall et al., 2008; Mollet et al., 2011; Rooney, 2020], магматизм в этой части рифта, начавшийся на рубеже 5,9 млн лет с формирования щелочных вулканов Эссимингор, Садиман, Мосоник и др., затем сменился обширными излияниями базальтов и базанитов из вулканических центров и кальдер Лемагарут, Нгоронгоро, Олдувай, Олмоти и др. Заключительный цикл вулканизма, продолжающийся до настоящего времени, вновь представлен щелочными расплавами и карбонатитами Олдоиньо Ленгаи. Таким образом, на протяжении относительно короткого временного интервала на относительно небольшой по площади территории в ходе нескольких магматических импульсов произошла радикальная смена состава расплавов, генерированных из разных мантийных уровней. Малая длительность магматических импульсов и высокая вариативность мантийных расплавов является, по-видимому, общей чертой современных рифтогенных структур. Помимо рифта Грегори в качестве примеров можно отметить образование крупных излияний платобазальтов Эфиопии, интервал формирования которых составляет 33–27 млн лет [Rooney, 2020]. Примером относительно коротких интервалов плюм-литосферных процессов, имевших место в фанерозойское время, являются гигантские покровы траппов плато Декан в Индии (~68 Ma), Кару-Феррар (183 Ma), сформированных в течение 1–2 млн лет [Burgess et al., 2017], а также траппов Сибири, образование которых происходило в течение двух относительно коротких магматических импульсов [Ivanov et al., 2013].

Бесспорно, характер эндогенных процессов в областях LIP и зонах рифтогенеза различен. В последних, вследствие пропации рифта в южном направлении от зоны Афар, этапы осадконакопления, последующей денудации в условиях континентальных обстановок вследствие плюм-литосферных процессов (doming) прерывались относительно короткими (первые млн лет) периодами магматизма [Rooney, 2020]. Следует также отметить широкий спектр составов расплавов, поступавших на поверхность в столь короткие периоды развития структур. В Сибирской провинции типичным толеитовым базальтам, формирующим основной объем траппов (240 Ма), предшествуют высоко-Ti умеренно-щелочные базальты и пикриты, отличающиеся повышенной щелочностью, кремнекислотностью и пониженной ролью железа.

Исходя из этих наблюдений, формирование Печенга-Имандра-Варзугского палеорифта не может рассматриваться с позиций постепенной, непрерывной смены циклов осадконакопления, магматической активности и денудации. Можно полагать, что длительные периоды стабилизации, отвечающие периодам осадконакопления, а также значительные по времени перерывы, происходившие в условиях континентальных обстановок, прерывались относительно короткими импульсами магматизма. Анализ с этих позиций эволюции Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры показывает, что длительность наиболее крупных этапов магматизма, зафиксированных на рубежах ~2,51; ~2,44; 2,06; 2,02 и 1,99 млн лет назад, не превышала нескольких млн лет. Таким образом, принимая во внимание данные по эволюции фанерозойских рифтогенных структур, хроностратиграфические схемы корреляции Печенга-Имандра-Варзугской структуры, базирующиеся на принципах «градуализма», должны быть пересмотрены с учетом предельно коротких интервалов длительности периодов магматической активности.

## Литература

Имандра-Варзугская зона карелид / Отв. ред. Г. И. Горбунов. Л.: Наука, 1982. 280 с.

Предовский А. А., Мележик В. А., Болотов В. И., Федотов Ж. А., Басалаев А. А., Козлов Н. Е., Иванов А. А., Жангуров А. А., Скуфьин П. К., Любцов В. В. Вулканизм и седиментогенез докембрия северо-востока Балтийского щита. Л.: Наука, 1987. 185 с.

Смолькин В. Ф. Магматизм раннепротерозойской (2,5–1,7 млрд лет) палеорифтогенной системы, северо-запад Балтийского щита // Петрология. 1997. Т. 5, № 4. С. 394–411.

Федотов Ж. А. Эволюция протерозойского вулканизма восточной части Печенгско-Варзугского пояса (петрогеохимический аспект). Апатиты: Кольск. фил. АН СССР, 1985. 118 с.

Amelin Yu. V., Heaman L. M., Semenov V. S. U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implication for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting // Precambrian Res. 1995. Vol. 75. P. 31–46. doi: 10.1016/0301-9268(95)00015-W

Burgess S. D., Muirhead J. D., Bowring S. A. Initial pulse of Siberian Traps sills as the trigger of the end-Permian mass extinction // Nature Communications. 2017. Vol. 8(1). Art. 164. doi: 10.1038/s41467-017-00083-9

Dawson J. B. The Gregory Rift Valley and Neogene-Recent volcanoes of Northern Tanzania // Geological Society of London, Memoirs. 2008. Vol. 33. doi: 10.1144/M33

Gould S. J., Eldredge N. Punctuated equilibrium comes of age // Nature. 1993. Vol. 366. P. 223–227. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.04.001

Ivanov A. V., He H., Yan L., Ryabov V. V., Shevko A. Y., Paleskii S. V., Nikolaeva I. V. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism // Earth-Science Reviews. 2013. Vol. 122. P. 58–76.

Le Gall B., Nonnotte P., Rolet J., Benoit M., Guillou H., Mousseau-Nonnotte M., Albaric J., Deverchère J. Rift propagation at craton margin. Distribution of faulting and volcanism in the North Tanzanian Divergence (East Africa) during Neogene times // Tectonophysics. 2008. Vol. 448. P. 1–19. doi: 10.1016/J.TECTO.2007.11.005

Martin R. F., Sokolov M., Magaji S. S. Punctuated anorogenic magmatism // Lithos. 2012. Vol. 152. P. 132–140. doi: 10.1016/J.LITHOS.2012.05.020

Melezhik V. (ed.), Prave A. R., Fallick A. E., Kump L. R., Strauss H., Lepland A., Hanski E. J. Reading the archive of Earth's oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Springer, 2012. 490 p.

Mollet G. F., Swisher III C. C., Feigenson M. D., Carr M. J. Petrology, geochemistry, and age of Satiman, Lemagurut and Oldeani: sources of the volcanic deposits of the Laetoli area // Harrison T. (ed.). Paleontology and Geology of Laetoli: Human Evolution in Context. Vol. 1: Geology, Geochronology, Paleoecology and Paleoenvironment. Dordrecht: Springer, 2011. P. 99–120.

Rooney T. O. The Cenozoic magmatism of East Africa: Part II – Rifting of the mobile belt // Lithos. 2020. Vol. 360–361. Art. 105291. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105381

## References

Fedotov Zh. A. Evolution of the Proterozoic volcanism in the eastern part of the Pechenga-Varzuga Belt (petrogeochemical aspect). Apatity: Kola Br. AS USSR; 1985. 118 p. (In Russ.)

Gorbunov G. I. (ed.). The Imandra-Varzuga zone of kareliides. Leningrad: Nauka; 1982. 280 p. (In Russ.)



*Predovskii A. A., Melezhib V. A., Bolotov V. I., Fedotov Zh. A., Basalaev A. A., Kozlov N. E., Ivanov A. A., Zhangurov A. A., Skuf'in P. K., Lyubtsov V. V.* Volcanism and sedimentogenesis of the Precambrian in the north-east of the Baltic Shield. Leningrad: Nauka; 1987. 185 p. (In Russ.)

*Smol'kin V. F.* Magmatism of the Early Proterozoic (2.5–1.7 Ga) paleoriftogenic system, northwest of the Baltic Shield. *Petrology*. 1997;5(4):394–411. (In Russ.)

*Amelin Yu. V., Heaman L. M., Semenov V. S.* U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implication for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting. *Precambrian Res.* 1995;75:31–46. doi: 10.1016/0301-9268(95)00015-W

*Burgess S. D., Muirhead J. D., Bowring S. A.* Initial pulse of Siberian Traps sills as the trigger of the end-Permian mass extinction. *Nature Communications*. 2017;8(1):164. doi: 10.1038/s41467-017-00083-9

*Dawson J. B.* The Gregory Rift Valley and Neogene-Recent volcanoes of Northern Tanzania. *Geological Society of London, Memoirs*. 2008;33. doi: 10.1144/M33

*Gould S. J., Eldredge N.* Punctuated equilibrium comes of age. *Nature*. 1993;366:223–227. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.04.001

*Ivanov A. V., He H., Yan L., Ryabov V. V., Shevko A. Y., Palesskii S. V., Nikolaeva I. V.* Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle

Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. *Earth-Science Reviews*. 2013;122:58–76.

*Le Gall B., Nonnotte P., Rolet J., Benoit M., Guillou H., Mousseau-Nonnotte M., Albaric J., Deverchère J.* Rift propagation at craton margin. Distribution of faulting and volcanism in the North Tanzanian Divergence (East Africa) during Neogene times. *Tectonophysics*. 2008;448:1–19. doi: 10.1016/J.TECTO.2007.11.005

*Martin R. F., Sokolov M., Magaji S. S.* Punctuated anorogenic magmatism. *Lithos*. 2012;152:132–140. doi: 10.1016/J.LITHOS.2012.05.020

*Melezhib V. (ed.), Prave A. R., Fallick A. E., Kump L. R., Strauss H., Lepland A., Hanski E. J.* Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Springer; 2012. 490 p.

*Mollet G. F., Swisher III C. C., Feigenson M. D., Carr M. J.* Petrology, geochemistry, and age of Sati-man, Lemagurut and Oldeani: sources of the volcanic deposits of the Laetoli area. *Harrison T. (ed.)* Paleontology and Geology of Laetoli: Human Evolution in Context. Vol. 1: Geology, Geochronology, Paleoecology and Paleoenvironment. Dordrecht: Springer; 2011. P. 99–120.

*Rooney T. O.* The Cenozoic magmatism of East Africa: Part II – Rifting of the mobile belt. *Lithos*. 2020;360–361:105291. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105381

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Арзамасцев Андрей Александрович**

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник  
лаборатории геологии и геодинамики

e-mail: arzamas@ipgg.ru

## CONTRIBUTOR:

**Arzamastsev, Andrey**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher,  
Geology and Geodynamics Laboratory

УДК 55 (551.21)

## СВЕКОФЕННСКИЙ АККРЕЦИОННЫЙ ОРОГЕН: СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ЕГО СТРОЕНИИ И ЭВОЛЮЦИИ

**Ш. К. Балтыбаев**

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034)*

Важной характеристикой пород Свеккофеннского орогена является преимущественно ювенильная природа вещества протерозойской коры и отсутствие геологических, петрологических и изотопно-геохимических свидетельств существования пород архейского комплекса в основании новообразованного блока свеккофеннид. Все породы в пределах Свеккофеннского орогена метаморфизованы в условиях от зеленосланцевой до гранулитовой фации метаморфизма при ранне- и поздне-свеккофеннском этапах эндогенной активности. Современная конфигурация и структуры зоны стыка между Свеккофеннским орогеном и Карельским кратоном отражают последовательное развитие ороклинов, а не субпараллельную амальгамацию островодужных комплексов.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит; Свеккофеннский ороген; зона сочленения; тектонические модели

Для цитирования: Балтыбаев Ш. К. Свеккофеннский аккреционный ороген: современные представления о его строении и эволюции // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 18–21. doi: 10.17076/geo1664

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГГД РАН FMUW-2022-0002 Минобрнауки России.

### **S. K. Baltybaev. SVECOFENNIAN ACCRETION OROGEN: MODERN VIEWS ON ITS STRUCTURE AND EVOLUTION**

*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)*

An important characteristic of the Svecofennian orogen is the predominantly juvenile nature of the Proterozoic crust matter and the absence of geological, petrological and isotopic-geochemical evidence of the existence of Archean complex rocks at the base of the newly formed block of the Svecofennides. All volcano-sedimentary rocks were altered to the granulite facies of metamorphism during two stages of endogenous activity. The modern configuration of and structures in the joint suture zone between Svecofennian orogeny and the Karelian craton reflect a consistent development of oroclinal rather than subparallel amalgamation of island-arc complexes.

Keywords: Fennoscandian Shield; Svecofennian orogen; suture zone; tectonic models

For citation: Baltybaev S. K. Svecofennian accretion orogen: modern views on its structure and evolution. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:18–21. doi: 10.17076/geo1664

Funding. The study was funded within state-ordered research theme of the Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS FMUW-2022-0002.

Свекофеннский ороген (СО) занимает не менее 1/3 площади выхода докембрийских пород Фенноскандии и является ярким представителем проявления аккреционной геодинамики в палеопротерозое. Хотя первые предположения об образовании палеопротерозойского комплекса вулканогенно-осадочных и plutonic пород в обстановках, сходных с обстановками современных активных окраин, высказывались давно [Nietanen, 1975], убедительный фактический материал был накоплен и проинтерпретирован только к концу 80-х годов прошлого века [Park, 1985; Gaál, Gorbachev, 1987 и др.]. Наиболее весомым аргументом в пользу существования обстановки «океан-континент» стало выявление пород двух офиолитовых комплексов на территории Финляндии – Йормуа и Оутокумпу [Kontinen, 1987]. Несмотря на различную интерпретацию природы и места образования этих комплексов (фрагмент океанической коры Свекофеннского океана или сохранившееся вещество задугового бассейна), исследователи сходились во мнении, что они маркируют древнюю конвергентную границу.

Ключевая роль в развитии свекофеннид Фенноскандии отводится амальгамации нескольких микроконтинентов и островодужных структур возраста 1,95–1,97 млрд лет. Но не исключается существование в пределах СО фрагментов протерозойских микроконтинентов возраста 2,0–2,1 млрд лет или даже древнее: разрушение этих гипотетических микроконтинентов привело к появлению детритовых цирконов, которых в парагнейсах орогена почти 2/3 [Nuhma et al., 1991].

Важной характеристикой СО является преимущественно ювенильная природа вещества протерозойской коры и отсутствие геологических, петрологических и изотопно-геохимических свидетельств существования пород архейского комплекса в основании новообразованного блока свекофеннид. Древний (архейский) коровый материал в породах СО известен только в виде детритовых цирконов, образующих в большинстве случаев каймами этого же минерала, но протерозойского возраста.

Легко диагностируемые архейские породы (в большинстве случаев – гранито-гнейсы и породы TTG-серий) дают возможность уверенно провести границу между новообразованным протерозойским блоком свекофеннид и окраинной областью архейского континента. Также одним из главных изотопно-геохимических параметров, позволяющим отделить блок свекофеннид от области развития пород, где встречаются как протерозойские, так и архейские породы, является величина  $\epsilon Nd$  в разновозрастных plutonic породах [Ohlander et al., 1993].

Но кроме геохронологических, изотопно-геохимических характеристик пород важную роль играют геологические и петрологические свидетельства, указывающие на древнюю конвергентную границу. Такие данные были получены на территории Северного Приладожья, где зона стыка пород СО и Карельского кратона (КК) наиболее хорошо обнажена в береговой зоне Ладожского озера и детально изучена. Здесь выявлены признаки полистадийного надвигания пород СО на КК с проявлением давления в надвиговой зоне, превышающего литостатическое [Балтыбаев и др., 2022].

Все породы в пределах СО метаморфизованы в условиях от зеленосланцевой до гранулитовой фации метаморфизма. На основе геологических наблюдений и геохронологических данных в пределах СО можно выделить два крупных этапа эндогенной активности и метаморфизма: раннесвекофеннский и позднесвекофеннский. Раннесвекофеннский метаморфизм (1,89–1,87 млрд лет) пород северной, «внешней», зоны свекофеннид обусловлен термическими аномалиями, предположительно возникшими в обстановках надсубдукционной тектоники, и связан с подъемом магматических масс основного и среднего (андезитового) состава, характерных для этих режимов. Многочисленные габбро-эндербитовые тела, тесно ассоциированные с гранулитовыми комплексами, рассматриваются в качестве дериватов этих глубинных магматических масс. В Южной Финляндии и Швеции присутствуют многочи-

сленные массивы гранитов, сопровождаемых К-мигматитами с характеристиками продуктов переплавления метапелитов. Пик эндогенной активности для указанных комплексов мигматит-гранитной зоны датируется интервалом 1,83–1,80 млрд лет [Ehlers et al., 1993], что позволяет выделить этот этап как этап поздне-свекофеннского магматизма и метаморфизма. Термические аномалии и поздне-свекофеннский метаморфизм гранулитовой ступени пород внутренней зоны свекофеннид связан с коровым магматизмом.

В последние годы в ряде публикаций финских геологов (Р. Лахтинен и соавторы) стали предлагаться модели тектонического развития СО, несколько отличающиеся от ранее предложенных [Gaál, Gorbatshev, 1987; Nironen, 1997]. Наиболее существенным в «новых» моделях является предположение о простирации ключевой сутуры между свекофеннидами и архейскими комплексами не на северо-запад, вплоть до Лофотенских островов в Норвегии, а в меридиональном направлении – между кратонами Норрботтен и Карельским. Также вышеуказанные финские исследователи считают, что современная конфигурация и структуры зоны стыка между СО и КК отражают последовательное развитие ороклинов [Lahtinen et al., 2022], а не субпараллельную амальгамацию островодужных комплексов, как это считалось ранее.

## Литература

Балтыбаев Ш. К., Вивдич Э. С., Галанкина О. Л., Борисова Е. Б. Флюидный режим формирования гнейсов в Мейерской надвиговой зоне Северного Приладожья (юго-восток Фенноскандинавского щита) // Петрология. 2022. Т. 30, № 2. С. 166–193. doi: 10.31857/S0869590322020029

Ehlers C., Lindroos A., Selonen O. The late Svecofennian granite-migmatite zone of southern Finland – a belt of transpressive deformation and granite emplacement // *Precambrian Res.* 1993. Vol. 64. P. 295–309.

Gaál G., Gorbatshev R. An outline of the Precambrian evolution of the Baltic Shield // *Precambrian Res.* 1987. Vol. 35, no. 1. P. 15–25.

Hietanen A. Generation of potassium-poor magmas in the northern Sierra Nevada and the Svecofennian in Finland // *J. Res. US Geol. Surv.* 1975. No. 3. P. 631–645.

Huhma H., Claesson S., Kinny P. D., Williams I. S. The growth of the Early Proterozoic crust: new evidence from Svecofennian detrital zircons // *Terra Nova.* 1991. Vol. 3, no. 2. P. 175–179.

Kontinen A. An early Proterozoic ophiolite – the Jormua mafic-ultramafic complex, northeastern Finland // *Precambrian Res.* 1987. Vol. 35. P. 313–341.

Lahtinen R., Salminen P. E., Sayab M., Huhma H., Kurhila M., Johnston S. T. Age and structural constraints on the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Saimaa orocline in Fennoscandia // *Precambrian Res.* 2022. Vol. 369. doi: 10.1016/j.precamres.2021.106477

Nironen M. The Svecofennian Orogen: a tectonic model // *Precambrian Res.* 1997. Vol. 86, no. 1-2. P. 21–44.

Öhlander B., Skiöld T., Elming S.-A., BABEL Working Group, Claesson S., Nisca D. H. Delineation and character of the Archaean–Proterozoic boundary in northern Sweden // *Precambrian Res.* 1993. Vol. 64. P. 67–84.

Park A. F. Accretion tectonism in the Proterozoic Svecokareliides at the Baltic Shield // *Geology.* 1985. Vol. 13, no. 10. P. 725–729.

## References

Baltybaev Sh. K., Vivdich E. S., Galankina O. L., Borisova E. B. Fluid regime of gneiss formation in the Meyeri thrust zone of the Northern Ladoga area (South-Eastern Fennoscandian Shield). *Petrologiya = Petrology.* 2022;30(2):166–193. doi: 10.31857/S0869590322020029 (In Russ.)

Ehlers C., Lindroos A., Selonen O. The late Svecofennian granite-migmatite zone of southern Finland – a belt of transpressive deformation and granite emplacement. *Precambrian Res.* 1993;64:295–309.

Gaál G., Gorbatshev R. An outline of the Precambrian evolution of the Baltic Shield. *Precambrian Res.* 1987;35(1):15–25.

Hietanen A. Generation of potassium-poor magmas in the northern Sierra Nevada and the Svecofennian in Finland. *J. Res. US Geol. Surv.* 1975;3:631–645.

Huhma H., Claesson S., Kinny P. D., Williams I. S. The growth of the Early Proterozoic crust: new evidence from Svecofennian detrital zircons. *Terra Nova.* 1991;3(2):175–179.

Kontinen A. An early Proterozoic ophiolite – the Jormua mafic-ultramafic complex, northeastern Finland. *Precambrian Res.* 1987. Vol. 35. P. 313–341.

Lahtinen R., Salminen P. E., Sayab M., Huhma H., Kurhila M., Johnston S. T. Age and structural constraints on the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Saimaa orocline in Fennoscandia. *Precambrian Res.* 2022;369. doi: 10.1016/j.precamres.2021.106477

Nironen M. The Svecofennian Orogen: a tectonic model. *Precambrian Res.* 1997;86(1-2):21–44.

Öhlander B., Skiöld T., Elming S.-A., BABEL Working Group, Claesson S., Nisca D. H. Delineation and character of the Archaean–Proterozoic boundary in northern Sweden. *Precambrian Res.* 1993;64:67–84.

Park A. F. Accretion tectonism in the Proterozoic Svecokareliides at the Baltic Shield. *Geology.* 1985;13(10):725–729.

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 24.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Балтыбаев Шаукет Каимович**

д-р геол.-мин. наук, заведующий лабораторией  
петро- и рудогенеза, главный научный сотрудник

*e-mail: shauket@mail.ru*

**CONTRIBUTOR:**

**Baltybaev, Shauket**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Head of Petro-  
and Ore Genesis Laboratory

УДК 551.2/.3+551.248.1

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОДИНАМИКИ НЕОПРОТЕРОЗОЯ

**Н. А. Божко**

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, геологический факультет (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119899)*

Рассматриваются некоторые особенности геодинамики неопротерозоя: формирование суперконтинентов, изменение характера субдукции, увеличение площади континентальных плит и скорости их движения, проявление асимметрии в тектоническом развитии Северного и Южного полушарий. Эти изменения в значительной степени предопределили переход к современному стилю геодинамики и новым глобальным экологическим, биогеохимическим и другим условиям.

Ключевые слова: геодинамика; Паннотия; суперконтинент; субдукция; Гондвана

Для цитирования: Божко Н. А. Некоторые особенности геодинамики неопротерозоя // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 22–25. doi: 10.17076/geo1684

### **N. A. Bozhko. SOME FEATURES OF NEOPROTEROZOIC GEODYNAMICS**

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology (1 Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119899)*

Some features of geodynamics in the Neoproterozoic are considered: the formation of supercontinents, changes in the nature of subduction, increase in the area of continental plates and the rate of their movement, manifestation of asymmetry in the tectonic development of the Northern and Southern hemispheres. These changes largely predetermined the transition to the modern style of geodynamics and new global ecological, biogeochemical and other conditions.

Keywords: geodynamics; Pannotia; supercontinent; subduction; Gondwana

For citation: Bozhko N. A. Some features of Neoproterozoic geodynamics. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:22–25. doi: 10.17076/geo1684

Существующие различия в геодинамике между фанерозоем и докембрием подготавливались в течение всей эволюции последнего. Каждый этап вносил в нее свои изменения. В

этом отношении неопротерозой занимает особое место. Неопротерозой продолжительностью от 1000 до 541 млн лет, непосредственно предшествуя фанерозою, многими исследова-

телями рассматривается как самый революционный период в истории Земли. В это бурное время планета испытывала ряд изменений, которые в значительной степени предопределили переход к современному стилю геодинамики и новым глобальным экологическим, биогеохимическим и другим условиям.

**Основное тектоническое содержание неопротерозоя выразилось в развитии новых суперконтинентов Родинии и Паннотии.** Нижний неопротерозой по времени соответствует существованию и распаду Родинии, сформировавшейся в Гренвильскую эпоху (около 1000 млн лет). С этим рубежом связаны значительные изменения в геодинамике Земли. Суперконтинент Родиния раскололся на северную половину (Восточная Гондвана, Катазия и Киммерия) и южную (Лаврентия, Амазония–Северо-Западная Африка, Балтика и Сибирь), с этой эпохой связано и раскрытие Тихого океана.

Фрагменты Родинии были объединены в новый суперконтинент. Развитие полифазной панафриканской орогении привело к формированию около 650 млн лет тому назад крупного древнего материка Гондвана, объединявшего ныне разобщенные континенты Южного полушария и Индию. В результате кратковременного слияния Гондваны с Балтикой, Сибирью и Лаврентией образовался «вендский суперконтинент», названный Пауэллом в 1995 г. Паннотия. С развитием палеомагнитных и геохронологических данных существование этого суперконтинента и цикла начало подвергаться сомнению. Однако результаты новых исследований свидетельствуют о *реальности древнего суперконтинента Паннотия* [Nance, Murphy, 2018 и др.]. В кембрии произошел распад Паннотии и окончательное обособление Гондваны как наиболее крупного его фрагмента.

**В неопротерозое произошли изменения в стиле развития коллизионных орогенов, выразившиеся, в частности, в появлении в позднем неопротерозое метаморфических пород голубосланцевой фации и ультравысокого давления, отсутствовавших в более древних поясах, что указывает, таким образом, на переход к режиму современной субдукции.** Среди существующих объяснений этому наиболее предпочтительным представляется подход, принимающий во внимание охлаждение Земли во времени [Brown, 2008 и др.]. На уровне 1 млрд лет температура верхней мантии была еще на 150–100 °С выше, чем сейчас, что препятствовало значительному погружению субдукци-

онного слэба. Охлаждение Земли в неопротерозое создало условия, благоприятные для перехода к холодной, глубокопроникающей и крутопадающей субдукции, что отразилось в появлении указанных пород. Результаты 2D числового моделирования континентальной коллизии [Sizova et al., 2014] подтверждают эти представления. Увеличение температуры в опытах на 80–100 градусов, что соответствует условиям протерозоя, привело к тектонике в условиях неглубокой субдукции.

**Увеличение размеров континентальных фрагментов в ходе суперконтинентальной цикличности достигло в неопротерозое появления мегаконтинентов.** Эволюция суперконтинентальной цикличности характеризуется увеличением площади суперконтинентов и составляющих их фрагментов во времени. Суперконтиненты архея формировались за счет слияния континентальных плит небольшого размера. Формирование суперконтинентов сопровождалось увеличением их размеров за счет прогрессивного новообразования континентальной коры в процессе их сборки. В неопротерозое этот процесс достиг такой степени, что начали формироваться гигантские мегаконтиненты типа Гондваны. Это имело следствие для геодинамики в плане расширения условий для создания термоизоляционного экрана и плюмообразования. Формирование ареалов континентальной коры больших размеров сопровождалось увеличением их мощности прежде всего за счет андерплейтинга базальтовой магмы.

**В неопротерозое отмечено увеличение скорости перемещения континентов в ходе суперконтинентальной цикличности.** Для позднего протерозоя и среднего кембрия была установлена чрезвычайно значительная скорость движения крупных континентов Лаврентии и Гондваны (до 24 см в год) [Meert et al., 1997]. Для объяснения этого быстрого движения был предложен ряд механизмов. Наиболее эффективными представляются модели, основанные на привлечении теплоизоляционного эффекта («одеяла»), возникающего под континентальной плитой достаточного размера, приводящего к увеличению общей теплоты мантии, увеличению плавучести континентальной плиты над ней и запуску плюмов нижней мантии. Этот процесс компенсирует отсутствие выходов теплового потока в виде срединно-океанических хребтов, возникающее из-за отсутствия их после создания суперконтинента. Гондвана могла служить в качестве такого мантийного изолятора, размеры которого благоприятствовали возникновению плюмов. Та-

ким образом, рассматриваемая особенность геодинамики неопротерозоя и отмеченная выше скорость перемещения континентов являются взаимосвязанными.

**Антисимметрия в геодинамической системе Северного и Южного полушарий проявилась в неопротерозое особенно выразительно.** Она выразилась в контрастах их тектонической активности [Божко, 2009]. Распад Родинии локализовался в основном в пределах южной полусферы и привел к новообразованию как океанических бассейнов (Гойянского, Хоггаро-Атакорского, Адаматор, Палеоазиатского и др.), так и интракратонных прогибов (Дамаро-Катангского и др.). Их замыкание в эпоху панафриканской орогении (около 600 млн лет) привело к слиянию всех южных континентальных фрагментов в мегаконтинент Протогондвана. В Лавразии орогения, синхронная панафриканской, практически не проявилась, на что обратил внимание Н. А. Штрейс еще в 1960-е годы. Таким образом, Лавразия в основном оставалась относительно монолитным фрагментом после распада Родинии. В результате слияния обломков Родинии между собой и новообразованной Гондваной возник «вендский суперконтинент» Паннотия. Примечательно отсутствие авлакогенной стадии в эволюции неопротерозойских платформенных чехлов Гондваны. Распад Паннотии к началу кембрия привел к полному обособлению монолитной Гондваны и активному расколу Лавразии на континенты Лаврентия, Балтика и Сибирь, разделенные новообразованными океанами.

**В неопротерозое отмечены глобальные изменения в процессах металлогении.** Тектонические события неопротерозоя нашли отражение в формировании ряда полезных ископаемых, что представляет особую тему для анализа. Хорошим примером может служить роль неопротерозоя в истории алмазоносного магматизма [Божко, 2019]. На рубеже около 1 млрд лет в распространении кимберлитового магматизма имел место скачок, сопровождавшийся образованием первого промышленного месторождения Премьер. При этом 95 % датированных кимберлитов оказываются моложе 750 млн лет, хотя редкие проявления фиксируются до архея включительно. Этот процесс проходил на фоне охлаждения мантии, что создавало благоприятные геодинамические и петрологические условия для извлечения алмазоносных кимберлитов, в частности, отмеченные выше изменения в стиле субдукции. Одним из факторов, способствовавших данной тенденции, могло быть также указанное выше

прогрессирующее увеличение площади континентальной коры в ходе суперконтинентальной цикличности.

Неопротерозой – бурное время глубоких экологических, биогеохимических, климатических изменений, включая изменение химии воды в океанах, развитие нескольких оледенений, появление и исчезновение эдиакарской фауны и другие. Они происходили на фоне отмеченных глобальных тектонических событий и были обусловлены ими. Вместе с тем эти события изучены далеко не полностью, и неопротерозой представляет собой неисчерпаемый объект для будущих исследований.

## Литература

- Божко Н. А. Суперконтинентальная цикличность в истории Земли // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2009. № 2. С. 13–27.
- Божко Н. А. Алмазоносный магматизм в суперконтинентальных циклах // Руды и металлы. 2019. № 3. С. 22–27. doi: 10.24411/0869-5997-2019-10020
- Brown M. Characteristic thermal regimes of plate tectonics and their metamorphic imprint throughout Earth history: when did Earth first adopt a plate tectonics mode of behavior? // Condie K. C., Pease V. (eds.). When Did Plate Tectonics Begin on Planet Earth? Geological Society of America Special Paper. 2008. Vol. 440. P. 97–128. doi: 10.1130/2008.2440(05)
- Meert J. G., Van der Voo R., Powell C. A., Li Z. X., McElhinny M. W., Chen Z., Symons D. T. A. A plate tectonic speed limit? // Nature. 1997. Vol. 363. P. 216–217.
- Nance R. D., Murphy J. B. Supercontinents and the case for Pannotia // Geological Society London Special Publications. 2018. Vol. 470(1):SP470.5. doi: 10.1144/SP470.5
- Sizova E., Gerya T., Brown M. Contrasting styles of Phanerozoic and Precambrian continental collision // Gondwana Research. 2014. Vol. 25(2). P. 522–545. doi: 10.1016/j.gr.2012.12.011

## References

- Bozhko N. A. Supercontinental cyclicity in the Earth's evolution. *Moscow University Geology Bulletin*. 2009;64(2):75–91. doi: 10.3103/S0145875209020021
- Bozhko N. A. Diamond magmatism in Supercontinental cycles. *Rudy i metall = Ores and Metals*. 2019;3:22–27. doi: 10.24411/0869-5997-2019-10020 (In Russ.)
- Brown M. Characteristic thermal regimes of plate tectonics and their metamorphic imprint throughout Earth history: when did Earth first adopt a plate tectonics mode of behavior? Condie K. C., Pease V. (eds.). When Did Plate Tectonics Begin on Planet Earth? Geological Society of America Special Paper. 2008;440:97–128. doi: 10.1130/2008.2440(05)
- Meert J. G., Van der Voo R., Powell C. A., Li Z. X., McElhinny M. W., Chen Z., Symons D. T. A. A plate tectonic speed limit? *Nature*. 1997;363:216–217.



Nance R. D., Murphy J. B. Supercontinents and the case for Pannotia. *Geological Society London Special Publications*. 2018;470(1):SP470.5. doi: 10.1144/SP470.5

Sizova E., Gerya T., Brown M. Contrasting styles of Phanerozoic and Precambrian continental collision. *Gondwana Research*. 2014;25(2):522–545. doi: 10.1016/j.j.gr.2012.12.011

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Божко Николай Андреевич**

д-р геол.-мин. наук, профессор

*e-mail: bozhko@yandex.ru*

#### **CONTRIBUTOR:**

**Bozhko, Nikolai**

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

УДК 552.48+553.86+470.22

## ЦИРКОНЫ ИЗ МАССИВНЫХ ЭКЛОГИТОВ О. СТОЛБИХА (РАЙОН С. ГРИДИНО, БЕЛОМОРСКАЯ ПРОВИНЦИЯ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА)

О. И. Володичев\*, Т. И. Кузенко

Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), \*volod@krc.karelia.ru

По данным изотопного анализа, в цирконах из массивных эклогитов о. Столбиха выделяются три возрастные группы: короткопризматический магматический циркон –  $2752 \pm 16$  млн лет (AR I), округлые метаморфические цирконы с включениями Omp –  $2683,1 \pm 7,8$  млн лет (AR II) и протерозойские призматические, редкие округлые метаморфические –  $1895,5 \pm 9,5$  млн лет (PR). Спектры распределения REE у цирконов AR I – магматического типа, у цирконов AR II – сопоставимого с эклогитовым. PR-цирконы в основном образовались за счет постепенного и полного замещения AR-цирконов, и спектр распределения REE в них имеет унаследованный и, за счет пропорционального разбавления при росте дополнительной массы кристаллов, подобный характер.

Ключевые слова: эклогит; циркон; возраст; морфология; спектр распределения REE

Для цитирования: Володичев О. И., Кузенко Т. И. Цирконы из массивных эклогитов о. Столбиха (район с. Гридино, Беломорская провинция Фенноскандинавского щита) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 26–29. doi: 10.17076/geo1686

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР Института геологии КарНЦ РАН АААА-А18-118020290085-4.

### О. I. Volodichev\*, T. I. Kuzenko. ZIRCONS FROM MASSIVE ECLOGITES ON STOLBIKHA ISLAND, GRIDINO AREA, BELOMORIAN PROVINCE, FENNOSCANDIAN SHIELD

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*volod@krc.karelia.ru

Isotope analysis has revealed three age groups of zircons in massive eclogites from Stolbikha Island: 1) short-prismatic igneous –  $2752 \pm 16$  Ma (AR I); 2) rounded metamorphic with Omp inclusions –  $2683.1 \pm 7.8$  Ma (AR II); and 3) Proterozoic prismatic, scarce rounded metamorphic –  $1895.5 \pm 9.5$  Ma (PR). The REE distribution spectra of AR 1 zircons are of igneous type and the type of spectra for AR II zircons is comparable

with that of eclogite. PR zircons were produced mainly by gradual and complete replacement of AR zircons, and their REE distribution spectrum displays an inherited pattern, which is due to proportional dilution provoked by the growth of additional crystals.

Keywords: eclogite; zircon; age; morphology; REE distribution spectrum

For citation: Volodichev O. I., Kuzenko T. I. Zircons from massive eclogites on Stolbikha Island, Gridino Area, Belomorian Province, Fennoscandian Shield. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:26–29. doi: 10.17076/geo1686

Funding. The study was funded within state-ordered research theme of the Institute of Geology KarRC RAS AAAA-A18-118020290085-4.

При изучении цирконов из массивных эклогитов о. Столбиха получены оригинальные данные по морфологическим и геохимическим особенностям соотношения архейских и протерозойской генераций, касающихся вопросов кристаллогенезиса цирконов и интерпретаций спектров распределения в них REE.

По данным изотопного анализа выделяются три возрастные группы цирконов: архейские –  $2752 \pm 16$  млн лет (AR I) и  $2683,1 \pm 7,8$  млн лет (AR II), протерозойская –  $1895,5 \pm 9,5$  млн лет (PR) [Volodichev et al., 2021]. При минералогической характеристике цирконов информативными оказываются результаты их CL-анализа.

Первая возрастная группа (AR I) представлена одним идиоморфным короткопризматическим кристаллом. Такая морфология предполагает его магматическое происхождение, соответствующее протолиту эклогитов. Вторая архейская группа цирконов представлена характерными для высокометаморфизованных пород гранулитовой и эклогитовой фаций кристаллами округлой формы (рис. 1, а). В двух кристаллах цирконов содержатся включения Опр [Volodichev et al., 2021].

Дальнейшая судьба архейских цирконов заключается в постепенном уменьшении их размера в ядерной части кристаллов до минимума, нередко с их фрагментацией и приобретением неправильных коррозионных форм (рис. 1, b). Размеры зон замещения постепенно увеличиваются. Светло-серые зоны присутствуют всегда, достигая в отдельных кристаллах относительно большего объема. К ним постепенно подключается, увеличивается в массе и становится доминирующей серая в CL протерозойская генерация цирконов. Конечным наблюдаемым продуктом этого процесса являются кристаллы протерозойского возраста, содержащие в центральной части реликты цирконов ранних генераций (рис. 1, с). Иногда до окончательной стадии этого процесса сохраняется округлая форма кристаллов, но чаще

кристаллы имеют призматический габитус. Вместе с тем выделяется и группа более крупных кристаллов с признаками осцилляционной зональности.

Описанные взаимоотношения архейских и протерозойских цирконов дают основание полагать, что призматические протерозойские цирконы в основном, вероятно, образовались по призматическим, в первооснове AR I, цирконам, а округлые – по округлым AR II (своего рода параморфозы (?) различных стадий развития) (рис. 1, b).

Изучение закономерностей в содержании элементов-примесей в цирконах показало прежде всего различающиеся спектры распределения REE в трех возрастных группах (рис. 2). Цирконы AR I характеризуются максимальным содержанием Lu и минимальным – La. Спектры второй возрастной архейской AR II группы имеют относительно пологий наклон с меньшим содержанием Lu при больших содержаниях LREE и являются вполне сопоставимыми (рис. 2) с соответствующими критериями принадлежности к эклогитам [Rubatto, 2002]. Спектры распределения REE цирконов протерозойской группы отличаются от такового в цирконах AR II меньшим содержанием всего ряда REE – от Lu до La. Показательны различия архейских и протерозойских цирконов со значительным снижением в протерозойских суммарного содержания LREE и HREE, REE, а также Y, Th, U и Th/U отношений [Volodichev et al., 2021].

В целом соотношение спектров концентраций REE, Y, U и Th в архейских и протерозойских цирконах носит *подобный* характер. Учитывая изложенные ранее данные о кристаллизации части протерозойских цирконов за счет архейских и двух промежуточных генераций, в качестве наиболее вероятного следует полагать, что концентрации REE, Y, U и Th в протерозойских цирконах являются *унаследованными*. При этом их пропорциональное снижение (в 2 раза) обусловлено *разбавлением* при кристаллизации возросшей

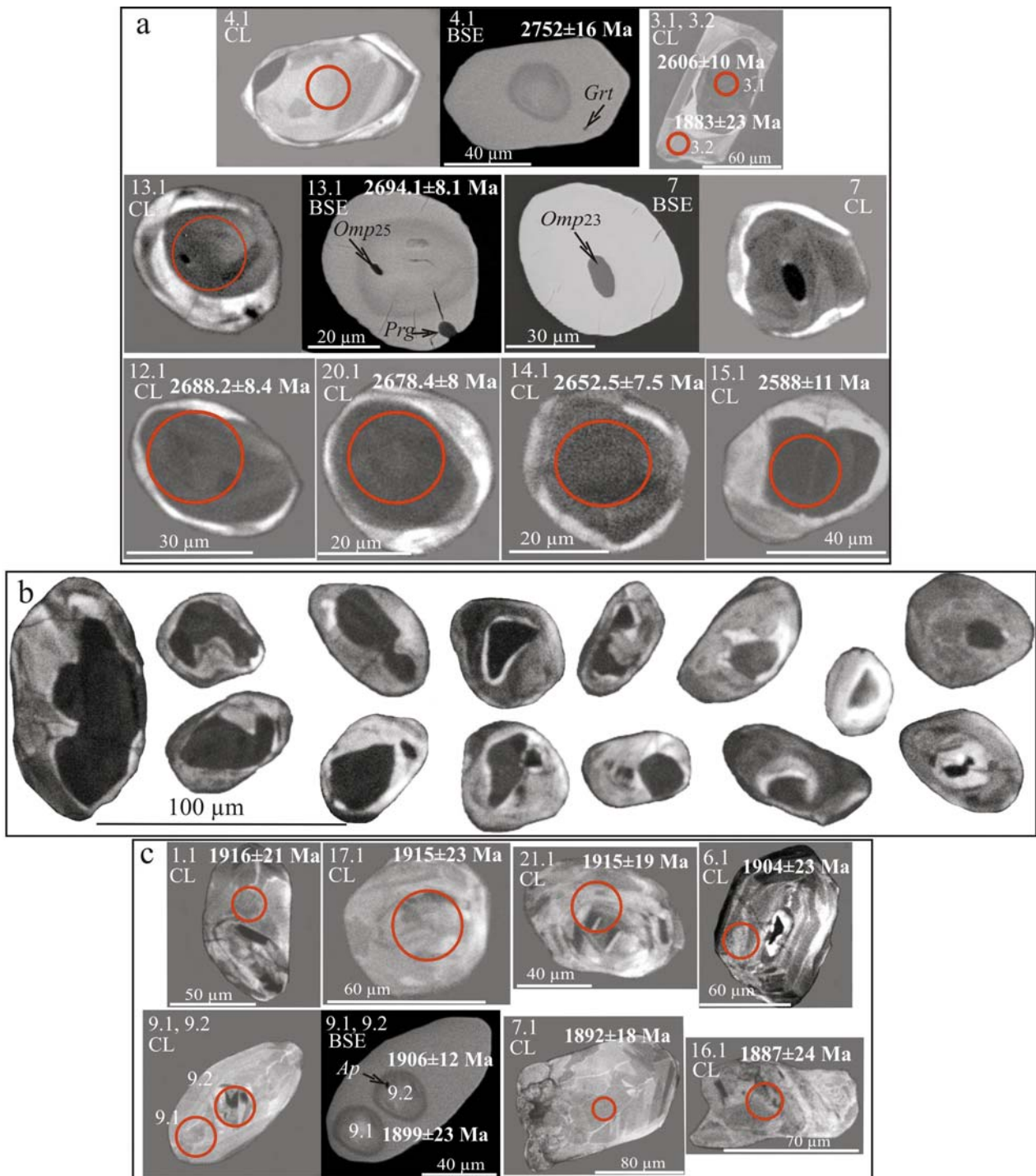


Рис. 1. а – изображения AR-цирконов из массивных эклогитов о. Столбиха; б – различные стадии замещения архейских (черные) цирконов протерозойскими (серые) с вероятным сохранением призматической (AR I) и округлой (AR II) морфоструктур; с – изображения PR-цирконов

Fig. 1. a – images of AR zircons from massive eclogites on the Stolbikha Island; b – various stages of replacement of the Archean zircons (black) by Proterozoic (grey) with possible preservation of prismatic (AR I) and rounded (AR II) morphostructures; c – images of PR zircons

массы протерозойских цирконов (в основном фракция крупных кристаллов). Дополнительное снижение концентраций в протерозойских цирконах LREE, Y и Th может быть обусловлено

переходом в новой геохимической обстановке этих элементов в состав других минералов, например, в состав новообразованных кристаллов монацита или алланита (?).

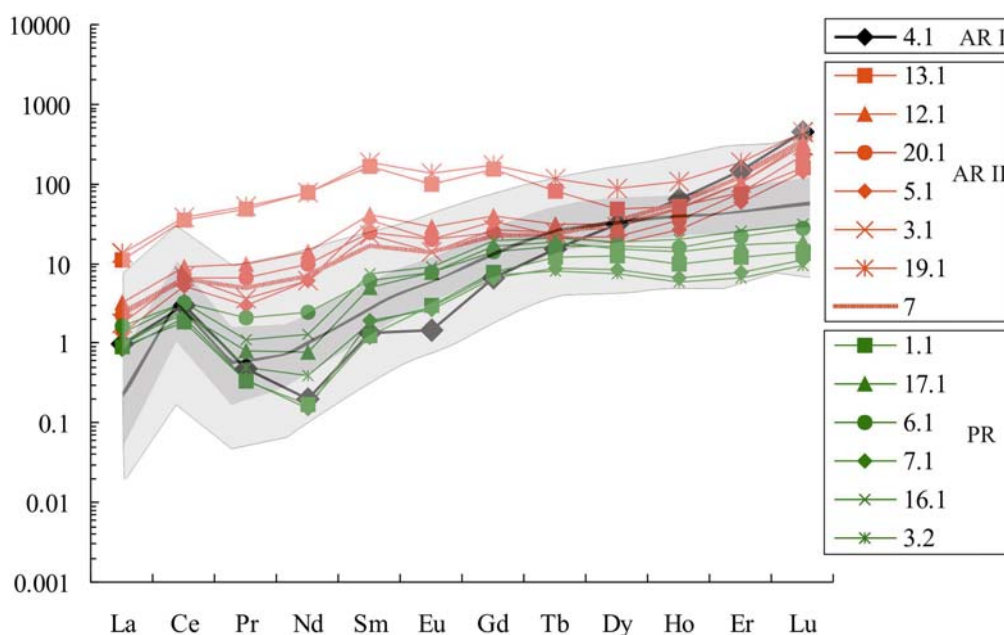


Рис. 2. Спектры распределения REE в цирконах из массивных эклогитов о. Столбиха на фоне генерализованных спектров распределения REE в цирконах из различных эклогитовых комплексов мира [Skublov et al., 2012]

Fig. 2. REE distribution spectra in zircons from massive eclogites on the Stolbikha Island against generalized REE distribution spectra of zircons from various eclogite complexes of the world [Skublov et al., 2012]

## Литература

Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism // *Chem. Geol.* 2002. Vol. 184. P. 123–138. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00355-2

Skublov S. G., Berezin A. V., Berezhnaya N. G. General relations in the trace-element composition of zircons from eclogites with implications for the age of eclogites in the Belomorian Mobile Belt // *Petrology.* 2012. Vol. 20, no. 5. P. 427–449. doi: 10.1134/S0869591112050062

Volodichev O. I., Maksimov O. A., Kuzenko T. I., Slabunov A. I. Archean zircons with omphacite inclusions from eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: The first finding // *Minerals.* 2021. Vol. 11. Art. 1029. doi: 10.3390/min11101029

## References

Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chem. Geol.* 2002;184:123–138. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00355-2

Skublov S. G., Berezin A. V., Berezhnaya N. G. General relations in the trace-element composition of zircons from eclogites with implications for the age of eclogites in the Belomorian Mobile Belt. *Petrology.* 2012;20(5): 427–449. doi: 10.1134/S0869591112050062

Volodichev O. I., Maksimov O. A., Kuzenko T. I., Slabunov A. I. Archean zircons with omphacite inclusions from eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: The first finding. *Minerals.* 2021;11:1029. doi: 10.3390/min11101029

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Володичев Олег Иванович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: volod@krc.karelia.ru

### Кузенко Татьяна Ивановна

ведущий геолог лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: volod@krc.karelia.ru

## CONTRIBUTORS:

### Volodichev, Oleg

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Geology Laboratory

### Kuzenko, Tatyana

Leading Geologist, Precambrian Geology and Geodynamics Laboratory

УДК [550.42:546.027.22+553.3](470.22)

## МУЛЬТИИЗОТОПНЫЙ ( $\delta^{33}\text{S}$ , $\delta^{34}\text{S}$ , $\delta^{36}\text{S}$ ) СОСТАВ СЕРЫ СУЛЬФИДОВ ДРЕВНИХ РУД: ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СЕРЫ, БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ГЕНЕЗИСА МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С. В. Высоцкий\*, Т. А. Веливецкая, А. В. Игнатъев

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (пр-т 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, Россия, 690022), \*svys@mail.ru

Получены новые данные об изотопном ( $\delta^{33}\text{S}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{36}\text{S}$ ) составе древних сульфидных руд Карельского и Сибирского кратонов. Анализ изотопного состава в сульфидах *in situ* позволил сделать выводы об источниках серы при формировании архейских месторождений, биологическом влиянии на процесс образования сульфидных руд, особенностях воздействия окружающей среды (атмосферы, гидросферы) на сульфидообразование.

Ключевые слова: изотопные аномалии серы; архей; Карельский кратон; Сибирский кратон

Для цитирования: Высоцкий С. В., Веливецкая Т. А., Игнатъев А. В. Мульти-изотопный ( $\delta^{33}\text{S}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{36}\text{S}$ ) состав серы сульфидов древних руд: значимость для определения источников серы, биогеохимических процессов и генезиса месторождений // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 30–33. doi: 10.17076/geo1687

Финансирование. Исследование выполнено в рамках научного проекта Российского научного фонда № 21-17-00076.

## S. V. Vysotskiy\*, T. A. Velivetskaya, A. V. Ignatiev. MULTI-ISOTOPE ( $\delta^{33}\text{S}$ , $\delta^{34}\text{S}$ , $\delta^{36}\text{S}$ ) COMPOSITION OF SULFUR IN SULFIDES OF ANCIENT ORES: SIGNIFICANCE FOR DETERMINING SULFUR SOURCES, BIOGEOCHEMICAL PROCESSES AND DEPOSIT GENESIS

Far Eastern Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (159 Prospect 100-letya Vladivostoka, 690022 Vladivostok, Russia), \*svys@mail.ru

New data on the isotopic ( $\delta^{33}\text{S}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{36}\text{S}$ ) composition of ancient sulfide ores of the Karelian and Siberian cratons were obtained. An *in situ* analysis of the isotope composition of the sulfides made it possible to draw conclusions about the sources of sulfur during the formation of Archean deposits, the biological influence on the formation of sulfide ores, and the features of the environmental impact (atmosphere, hydrosphere) on sulfide formation.

Keywords: sulfur isotope anomalies; Archean; Karelian Craton; Siberian Craton

For citation: Vysotskiy S. V., Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V. Multi-isotope ( $\delta^{33}\text{S}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{36}\text{S}$ ) composition of sulfur in sulfides of ancient ores: significance for determining sulfur sources, biogeochemical processes and deposit genesis. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:30–33. doi: 10.17076/geo1687

Funding. The study was supported by Russian Science Foundation grant #21-17-00076.

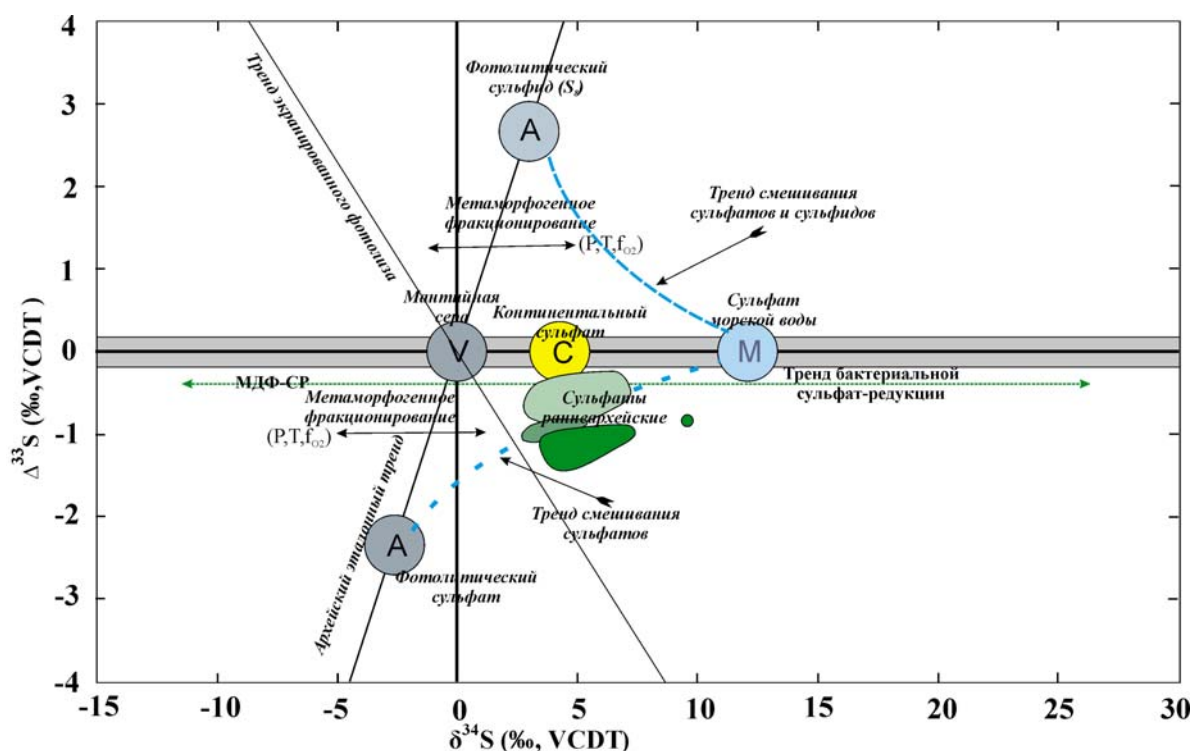
При образовании сульфидов сера может поступать из разных источников – магматических и осадочных пород, атмосферы, морской воды. Представление о геохимических резервуарах, из которых поступает сера, и некоторых геохимических процессах может дать масс-зависимое фракционирование серы (MDF-S; отслеживается по изменению  $\delta^{34}\text{S}$ ). Однако определения только  $\delta^{34}\text{S}$  недостаточно для всесторонней характеристики динамических минеральных систем, в которых химические процессы, такие как растворение, осаждение, разложение жидкой фазы и окислительно-восстановительные реакции, являются изменяющимися параметрами, регулирующими мобилизацию, перенос и осаждение металлов. Зачастую бывает сложно выяснить, какой из этих конкурирующих процессов вызывает изотопную изменчивость.

Открытие и теоретическое понимание масс-независимого фракционирования малораспространенных изотопов серы ( $^{33}\text{S}$  и  $^{36}\text{S}$ ) предоставило новый инструмент для изучения процессов рудообразования и источников серы в архее. Масс-независимое фракционирование серы (MIF-S; отслеживается по изменению  $\Delta^{33}\text{S}$  и  $\Delta^{36}\text{S}$ ) является химически консервативным индикатором, представляющим отклонение от процессов масс-зависимого фракционирования. MIF-S – это метка, сообщаемая молекулам серы, которые фотохимически взаимодействовали с УФ-лучами в атмосфере [Farquhar et al., 2000]. Присутствие изотопно-аномальной серы указывает на то, что сера прошла через атмосферный фотохимический цикл прежде, чем быть заархивированной в сульфидной форме в породах. Подтверждение этого процесса получено недавно в экспериментах [Velivetskaya et al., 2020], демонстрирующих, что источник изотопных аномалий серы с архейскими характеристиками ассоциируется с фотохимическими реакциями, протекающими в бескислородной атмосфере под воздействием ультрафиолетового излучения на диоксид серы  $\text{SO}_2$ . То есть MIF-S – это процесс, который

происходит в атмосфере, но также является изотопной меткой, сохраненной в архейских супракристаллических породах, где фотолитическая сера концентрировалась и накапливалась в сульфидах и сульфатах.

Это имеет важные последствия для понимания цикла серы в архее, происхождения различных микробных метаболизмов, химии гидротермальных и поверхностных вод. Комбинированные значения  $\delta^{33}\text{S}$ ,  $\delta^{36}\text{S}$  и  $\delta^{34}\text{S}$  позволяют распознавать атмосферные источники серы из-за образования аномальных количеств  $^{33}\text{S}$  и  $^{36}\text{S}$ . Нами были проведены исследования мультиизотопного состава серы ( $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\Delta^{33}\text{S}$  и  $\Delta^{36}\text{S}$ ) в сульфидах месторождений возрастом ~ 2,9–3,0 млрд лет, расположенных в пределах Фенноскандинавского щита и на Шарыжалгайском выступе фундамента Сибирского кратона. Полученные результаты и анализ опубликованных материалов по изотопии серы позволили наметить основные тренды, запечатленные в архейских сульфидах (рис.).

Проведенные нами исследования мультиизотопных характеристик сульфидной серы из архейских пород Фенноскандинавского щита и Сибирской платформы [Velivetskaya et al., 2022; Vysotskiy et al., 2022] в совокупности с имеющимися изотопными данными для сульфидных образований в древних породах Африки, Австралии и Канады не оставляют сомнений в том, что процесс фотохимического круговорота серы в архейскую эру – это явление планетарного значения. Возникновение сульфидных образований в архее во многом обязано активному влиянию фотохимических процессов на трансформацию серы в ее общем геохимическом круговороте в течение всей первой половины геологической истории Земли. Изучение изотопных отношений серы, включая малораспространенные изотопы  $^{36}\text{S}$  и  $^{33}\text{S}$ , наиболее ярко демонстрирует генетическую значимость изотопных характеристик в идентификации и понимании источников серы, биогеохимических процессов и особенностей генезиса месторождений.



Интерпретация механизмов изотопного фракционирования серы в архейских сульфидах.

Серая область вдоль оси  $\delta^{34}\text{S}$ : масс-зависимое фракционирование изотопов S ( $\Delta^{33}\text{S} = 0 \pm 0.2 \text{ ‰}$ ); данные выше или ниже этого диапазона считаются отклонениями от масс-зависимого фракционирования (MIF). MDF-CP – тренд масс-зависимого фракционирования в результате бактериальной сульфатредукции. Линия A-V-A – архейский эталонный тренд ( $\Delta^{33}\text{S} = 0.89 \delta^{34}\text{S}$ ) [Ono et al., 2003]; A – атмосферная сера, V – вулканогенная сера, C – континентальный сульфат, M – сульфат морской воды. Пунктирными линиями показано смешение серы морской воды и фотолитической аэрозольной. Тренд экранированного фотолиза – фотолиз  $\text{SO}_2$  при  $\lambda < 202 \text{ нм}$  при фреатических кислых извержениях [Muller et al., 2016]

Interpretation of the mechanisms of sulfur isotope fractionation in the Archean sulfides.

Grey area along  $\delta^{34}\text{S}$  axis: mass-dependent S isotopic fractionation ( $\Delta^{33}\text{S} = 0 \pm 0.2 \text{ ‰}$ ); data isotopic deviations above or below this band are considered mass-independent fractionation (MIF) excursions. MDF-BSR – line of bacterial sulfate reduction of mass-dependent fractionation. The A-V-A line is the Archean Reference Array ( $\Delta^{33}\text{S} = 0.89 \delta^{34}\text{S}$ ) [Ono et al., 2003]; A – atmospheric sulfur, V – volcanogenic sulfur, C – continental sulfate, M – seawater sulfate. Dashed lines indicate reservoir mixing –  $\text{SO}_2$  photolysis under  $\lambda < 202 \text{ nm}$  with phreatic felsic volcanic eruptions [Muller et al., 2016]

## Литература

Farquhar J., Bao H., Thiemens M. Atmospheric influence of Earth's earliest sulphur cycle // Science. 2000. Vol. 289. P. 756–758. doi: 10.1126/science.289.5480.756

Muller É., Philippot P., Rollion-Bard C., Cartigny P. Multiple sulfur-isotope signatures in Archean sulfates and their implications for the chemistry and dynamics of the early atmosphere // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2016. Vol. 113, no. 127. P. 7432–7437. doi: 10.1073/pnas.1520522113

Ono S., Eigenbrode J. L., Pavlov A. A., Kharrecha P., Rumble III D., Kasting J. F., Freeman K. H. New insights into Archean sulfur cycle from mass-independent sulfur isotope records from the Hamersley Basin, Australia // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 213. P. 15–30. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00295-4

Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Yakovenko V. V. Mass-independent sulfur isotope fractionation in the photochemical  $\text{SO}_2$  processes under the UV radiation of different wave length // Geochemistry International. 2020. Vol. 58, no. 11. P. 1228–1238. doi: 10.1134/S0016702920110105

Velivetskaya T. A., Vysotskii S. V., Khanchuk A. I., Ignatiev A. V., Kuleshevich L. V. Distribution of sulfur isotope anomalies in the Archean: The example of the Karelian and Siberian Cratons // Doklady Earth Sciences. 2022. Vol. 502, Part 1. P. 7–12. doi: 10.1134/S1028334X22010093

Vysotskiy S. V., Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Kuleshevich L. V., Slabunov A. I. Multiple sulfur isotope compositions in Mesoarchean sulfide deposits of the Karelian Craton: Implications for determining the sulfur source, biogeochemical processes, and deposit genesis // Russian Geology and Geophysics. 2022. P. 1–18. doi: 10.2113/RGG20214413



## References

Farquhar J., Bao H., Thiemens M. Atmospheric influence of Earth's earliest sulphur cycle. *Science*. 2000;289:756–758. doi: 10.1126/science.289.5480.756

Muller É., Philippot P., Rollion-Bard C., Cartigny P. Multiple sulfur-isotope signatures in Archean sulfates and their implications for the chemistry and dynamics of the early atmosphere. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2016;113(127):7432–7437. doi: 10.1073/pnas.1520522113

Ono S., Eigenbrode J. L., Pavlov A. A., Kharecha P., Rumble III D., Kasting J. F., Freeman K. H. New insights into Archean sulfur cycle from mass-independent sulfur isotope records from the Hamersley Basin, Australia. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003;213:15–30. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00295-4

Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Yakovenko V. V. Mass-independent sulfur isotope fractionation in the photochemical SO<sub>2</sub> processes under the UV radiation of different wave length. *Geochemistry International*. 2020;58(11):1228–1238. doi: 10.1134/S0016702920110105

Velivetskaya T. A., Vysotskii S. V., Khanchuk A. I., Ignatiev A. V., Kuleshevich L. V. Distribution of sulfur isotope anomalies in the Archean: The example of the Karelian and Siberian Cratons. *Doklady Earth Sciences*. 2022;502(1):7–12. doi: 10.1134/S1028334X22010093

Vysotskiy S. V., Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Kuleshevich L. V., Slabunov A. I. Multiple sulfur isotope compositions in Mesoarchean sulfide deposits of the Karelian Craton: Implications for determining the sulfur source, biogeochemical processes, and deposit genesis. *Russian Geology and Geophysics*. 2022:1–18. doi: 10.2113/RGG20214413

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 09.09.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Высоцкий Сергей Викторович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник

e-mail: svys@mail.ru

### Веливецкая Татьяна Алексеевна

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: velivetskaya@mail.ru

### Игнатьев Александр Васильевич

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: ignatiev@fegi.ru

## CONTRIBUTORS:

### Vysotskiy, Sergey

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

### Velivetskaya, Tatiana

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

### Ignatiev, Alexander

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

УДК 550.4; 550.93

## РЕЛИКТЫ РАЗРУШЕННЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ОСТРОВНЫХ ДУГ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОМ ВЯТСКОМ ОРОГЕНЕ (ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ КРАТОН)

К. Г. Ерофеева<sup>1,2\*</sup>, А. В. Самсонов<sup>1</sup>, Т. А. Пилицына<sup>1</sup>,  
А. Н. Ларионов<sup>3</sup>, В. А. Спиридонов<sup>4</sup>, А. В. Постников<sup>5</sup>,  
А. Ю. Вовшина<sup>3</sup>, А. С. Дубенский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017), \*[xenin.erofeeva@ya.ru](mailto:xenin.erofeeva@ya.ru)

<sup>2</sup> Геологический институт РАН (Пыжевский пер., 7, Москва, Россия, 119017)

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского (Средний проспект, 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106)

<sup>4</sup> ВНИИ Геосистем (Варшавское шоссе, 8, Москва, Россия, 117105)

<sup>5</sup> РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина (Ленинский просп., 63/2, Москва, Россия, 119991)

На основе изучения раннедокембрийских метаморфизованных вулканогенно-осадочных пород Вятского пояса (Волго-Уральский сегмент Восточно-Европейского кратона) рассмотрены вопросы тектонических обстановок его формирования и места в палеоконтинентальных корреляциях 2,2–2,0 млрд лет назад.

Ключевые слова: Восточно-Европейский кратон; Волго-Уралия; орогены; островные дуги

Для цитирования: Ерофеева К. Г., Самсонов А. В., Пилицына Т. А., Ларионов А. Н., Спиридонов В. А., Постников А. В., Вовшина А. Ю., Дубенский А. С. Реликты разрушенных океанических островных дуг в палеопротерозойском Вятском орогене (Восточно-Европейский кратон) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 34–37. doi: 10.17076/geo1656

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках госзадания лаборатории петрографии ИГЕМ РАН.

**K. G. Erofeeva<sup>1,2\*</sup>, A. V. Samsonov<sup>1</sup>, T. A. Pilitsyna<sup>1</sup>, A. N. Larionov<sup>3</sup>, V. A. Spiridonov<sup>4</sup>,  
A. V. Postnikov<sup>5</sup>, A. Yu. Vovshina<sup>3</sup>, A. S. Dubenskiy<sup>2</sup>. RELICTS OF DESTROYED  
OCEANIC ISLAND ARCS IN THE PALEOPROTEROZOIC VYATKA OROGEN  
(EAST-EUROPEAN CRATON)**

<sup>1</sup> Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM), Russian Academy of Sciences (35 Staromonetnyi Per., 119017 Moscow, Russia),

\*[xenin.erofeeva@ya.ru](mailto:xenin.erofeeva@ya.ru)

<sup>2</sup> Geological Institute, Russian Academy of Sciences (7 Pyrzhevsky Per., 119017 Moscow, Russia)

<sup>3</sup> Karpinsky Russian Geological Research Institute (74 Sredny Prospect, 199106 St. Petersburg, Russia)

<sup>4</sup> VNIIGeosystem (8 Varshavskoe Shosse, 117105 Moscow, Russia)

<sup>5</sup> Gubkin State University of Oil and Gas (63/2 Leninsky Ave., 119991 Moscow, Russia)

On the basis of the study of Early Precambrian metamorphosed volcanogenic-sedimentary rocks of the Vятka belt of the northeastern Volga-Ural megablock, East European Craton, the paper will consider the tectonic settings for the formation of this belt and its position in the paleocontinental correlations 2.2-2.0 Ga ago.

Keywords: East European Craton; Volgo-Uralia; orogens; oceanic island arcs

For citation: Erofeeva K. G., Samsonov A. V., Pilitsyna T. A., Larionov A. N., Spiridonov V. A., Postnikov A. V., Vovshina A. Yu., Dubenskiy A. S. Relicts of destroyed oceanic island arcs in the Paleoproterozoic Vятka Orogen (East-European Craton). *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:34–37. doi: 10.17076/geo1656

Funding. The study was funded under state assignment to the Petrography Laboratory IGEM RAS.

Вятский пояс выделен по результатам бурения и оконтурен по геофизическим данным как крупная вулканогенно-осадочная структура, зажатая между архейскими гранито-гнейсовыми блоками [Bogdanova et al., 2016]. Вятский пояс слагают Hbl-Bt-гнейсы, сохранившие Pl-порфиоровую структуру и образованные за счет вулканогенного протолита, и Crd-Sil-Grt-Bt-гнейсы первично осадочного происхождения. Эти вулканогенно-осадочные породы, объединяемые в унийскую свиту, прорваны жилами гнейсовидных Ms-Bt-трондьемитов талицкого комплекса мощностью от первых сантиметров до 5 метров.

По составу метавулканыты отвечают известково-щелочным высокоглиноземистым андезитам и дацитам калинатрового ряда ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ ), имеют сильно обогащенные спектры легких РЗЭ, умеренно фракционированные спектры тяжелых РЗЭ и отрицательные аномалии Sr, Eu, Ti и всех HFSE. Метаосадочные породы отвечают грауваккам и по содержанию большинства главных и редких элементов близки к метавулканитам, которые могли служить их источником.

U-Pb-изотопное датирование циркона из метавулканитов и метаосадков в разных частях пояса дает близкие спектры возрастов с тремя главными пиками. Циркон с возрастом 2,10 млрд лет доминирует в метавулканитах (> 90 %) и составляет до 70 % популяции в метаосадочных породах, что служит еще одним аргументом в пользу образования осадков за счет разрушения смежных вулканических построек. Циркон с возрастом 2,14 млрд лет составляет до 15 % популяций во всех пробах метаосадочных пород, что указывает на присутствие в Вятском поясе еще одного, пока

что не обнаруженного, источника палеопротерозойского магматического циркона. Циркон с возрастом 2,05 млрд лет, найденный во всех породах в виде каем обрастания и мелких кристаллов, мог образоваться при внедрении Ms-Bt-трондьемитов, возраст которых оценен в 2,05 млрд лет. Радиогенный изотопный состав Nd в метавулканитах ( $\epsilon_{\text{Nd}}(2100) = 3,2 \pm 0,2$ ) указывает на ювенильный источник магм. Более низкие величины  $\epsilon_{\text{Nd}}(2100) = 2,5 \pm 0,3$  в метаосадочных породах свидетельствуют о небольшом вкладе более древнего материала, что согласуется с находками в них единичных архейских зерен циркона.

Весь комплекс данных дает убедительные свидетельства об образовании пород унийской свиты Вятского пояса на удалении от архейских блоков, во внутриокеанической надсубдукционной обстановке, при формировании двух разновозрастных островных дуг 2,10 и 2,14 млрд лет, разрушение которых с образованием граувакковых отложений могло происходить за счет субдукционной эрозии [например, Straub et al., 2020].

Близкие по геохимии флишоидные осадки с ювенильными островодужными источниками и с возрастом циркона 2,1–2,2 млрд лет слагают Волго-Донской пояс [например, Бибикина и др., 2009; Terentiev, Santosh, 2016], который располагается между Волго-Уральским и Сарматским мегаблоками [Bogdanova et al., 2016]. Восточный фланг Вятского пояса, возможно, был частью обширного палеопротерозойского орогена вместе с Батомгским поясом юго-восточной части Сибирского кратона. Такая корреляция обоснована сходством возраста корообразующих процессов этих двух поясов

[Котов, 2003; Мишкин и др., 2010; Гурьянов и др., 2016; Кузьмин и др., 2016] и существующими палеоконтинентальными корреляциями [Elming et al., 2021 и ссылки в ней]. Полученные данные расширяют список палеопротерозойских орогенов с возрастом 2,2–2,0 млрд лет, в которых начало амальгамации отдельных архейских блоков в суперконтинент Нуна происходило на фоне главного этапа раскола архейских суперкратонов 2,2–2,0 млрд лет назад [Condie et al., 2021].

## Литература

Бибикина Е. В., Богданова С. В., Постников А. В., Попова Л. П., Кирнозова Т. И., Фугзан М. М., Глушченко В. В. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракрустальных пород и гранитоидов // Стратиграфия и геологическая корреляция. 2009. № 6. С. 3–16.

Гурьянов В. А., Диденко А. Н., Песков А. Ю., Роганов Г. В., Дымович В. А. Раннедокембрийские гранитоиды Батомгского выступа фундамента Юго-Востока сибирской платформы: возраст и геодинамическая обстановка формирования // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35, № 3. С. 23–44.

Котов А. Б. Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 78 с.

Кузьмин В. К., Богомолов Е. С., Глебовицкий В. А. Раннепротерозойский габбро-диорит-гранитный магматизм Батомгского поднятия (Северо-Восток Алданского щита): Sm-Nd-изотопно-геохимические свидетельства // ДАН. 2016. Т. 466, № 6. С. 707. doi: 10.7868/S0869565216060177

Мишкин М. А., Ленников А. М., Баянова Т. Б., Вовна Г. М., Сахно В. Г., Октябрьский Р. А., Бадрединов З. Г. Первые результаты U-Pb геохронологических исследований докембрийских гранитоидов Батомгского блока Алданского щита // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29, № 3. С. 45–49.

Bogdanova S. V., Gorbatshev R., Garetsky R. G. EUROPE | East European Craton // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 2016. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X

Condie K. C., Pisarevsky S. A., Puetz S. J. LIPs, orogens and supercontinents: The ongoing saga // Gondwana Res. 2021. Vol. 96. P. 105–121. doi: 10.1016/j.gr.2021.05.002

Elming S.-Å., Salminen J., Pesonen L. J. Chapter 16: Paleo-Mesoproterozoic Nuna supercycle // Pesonen L. J., Salminen J., Evans D. A. D., Elming S.-Å., Veikkolainen T. (eds.). Ancient Supercontinents and the Paleogeography of the Earth. Elsevier, 2021. P. 499–548. doi: 10.1016/B978-0-12-818533-9.00001-1

Straub S. M., Gómez-Tuena A., Vannucchi P. Subduction erosion and arc volcanism // Nat. Rev. Earth

Environ. 2020. Vol. 1. P. 574–589. doi: 10.1038/s43017-020-0095-1

Terentiev R. A., Santosh M. Detrital zircon geochronology and geochemistry of metasediments from the Vorontsovka terrane: implications for microcontinent tectonics // Int. Geol. Rev. 2016. Vol. 58, no. 9. P. 1108–1126. doi: 10.1080/00206814.2016.1147386

## References

Bibikova E. V., Bogdanova S. V., Postnikov A. V., Popova L. P., Kirnozova T. I., Fugzan M. M., Glushchenko V. V. Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: Isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids. *Stratigr. Geol. Correl.* 2009;17(6):561–573. doi: 10.1134/S086959380906001X

Bogdanova S. V., Gorbatshev R., Garetsky R. G. EUROPE | East European Craton. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier; 2016. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X

Condie K. C., Pisarevsky S. A., Puetz S. J. LIPs, orogens and supercontinents: The ongoing saga. *Gondwana Res.* 2021;96:105–121. doi: 10.1016/j.gr.2021.05.002

Elming S.-Å., Salminen J., Pesonen L. J. Chapter 16: Paleo-Mesoproterozoic Nuna supercycle. *Pesonen L. J., Salminen J., Evans D. A. D., Elming S.-Å., Veikkolainen T. (eds.). Ancient Supercontinents and the Paleogeography of the Earth*. Elsevier; 2021. P. 499–548. doi: 10.1016/B978-0-12-818533-9.00001-1

Guryanov V. A., Didenko A. N., Peskov A. Y., Roganov G. V., Dymovich V. A. Early Precambrian granitoids of the Batomga inlier of the southeastern Siberian Platform basement: Age and geodynamic formation settings. *Russ. J. of Pac. Geol.* 2016;10:168–188. doi: 10.1134/S1819714016030039

Kotov A. B. Boundary conditions of geodynamic models of the formation of the continental crust of the Aldan Shield: Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg: SPbGU; 2003. (In Russ.)

Kuzmin V. K., Bogomolov E. S., Glebovitskii V. A. Paleoproterozoic gabbro-diorite-granite magmatism of the Batomga Rise (NE Aldan Shield): Sm-Nd isotope geochemical evidence. *Dokl. Earth Sci.* 2016;466:199–205. doi: 10.1134/S1028334X16020203

Mishkin M. A., Lennikov A. M., Bayanova T. B., Vovna G. M., Sakhno V. G., Oktyabr'skii R. A., Badredinov Z. G. First results of U-Pb geochronological studies of the Precambrian granitoids of the Batomga block of the Aldan Shield. *Russ. J. of Pac. Geol.* 2010;4:223–227. doi: 10.1134/S1819714010030048

Straub S. M., Gómez-Tuena A., Vannucchi P. Subduction erosion and arc volcanism. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020;1:574–589. doi: 10.1038/s43017-020-0095-1

Terentiev R. A., Santosh M. Detrital zircon geochronology and geochemistry of metasediments from the Vorontsovka terrane: implications for microcontinent tectonics. *Int. Geol. Rev.* 2016;58(9):1108–1126. doi: 10.1080/00206814.2016.1147386

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Ерофеева Ксения Геннадьевна**

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник

*e-mail: xenin.erofeeva@ya.ru*

### **Самсонов Александр Владимирович**

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

*e-mail: samsonovigem@mail.ru*

### **Пилицына Татьяна Андреевна**

младший научный сотрудник

*e-mail: allafia@yandex.ru*

### **Ларионов Александр Николаевич**

д-р геол.-мин. наук

*e-mail: alexander\_larionov@vsegei.ru*

### **Спиридонов Виктор Альбертович**

ведущий специалист

*e-mail: vik-spiridonov@yandex.ru*

### **Постников Александр Васильевич**

д-р геол.-мин. наук, зав. кафедрой литологии

*e-mail: postnikov.a@gubkin.ru*

### **Вовшина Анна Юрьевна**

ведущий геолог

*e-mail: anna\_vovshina@vsegei.ru*

### **Дубенский Александр Сергеевич**

канд. хим. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: alexchem206@gmail.com*

## **CONTRIBUTORS:**

### **Erofeeva, Kseniya**

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

### **Samsonov, Alexander**

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

### **Pilitsyna, Tatiana**

Junior Researcher

### **Larionov, Alexander**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.)

### **Spiridonov, Viktor**

Leading Specialist

### **Postnikov, Alexander**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Lithology Department

### **Vovshina, Anna**

Leading Geologist

### **Dubenskiy, Alexander**

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher

УДК 552.3

## **ВЛИЯНИЕ ДРЕВНЕГО СУБДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА НА ОБРАЗОВАНИЕ ПОЗДНЕКОЛЛИЗИОННОГО ВУЛКАНИЗМА МАЛОГО КАВКАЗА**

**Н. А. Имамвердиев**

*Бакинский государственный университет (ул. З. Халилова, 33, Баку, Азербайджанская Республика, Az 1148)*

В работе рассматриваются петрогеохимические особенности позднекайнозойского коллизионного вулканизма Малого Кавказа. На основе новых геохимических данных показано, что для основных и средних пород наблюдаются Nb, Ta, Hf и Zr минимумы. Салические породы сильно обогащены Rb, Ba, Th, La и обеднены Ti, Yb, Y относительно примитивной мантии. Обогащение несовместимыми элементами предполагает, что источником расплава, из которого получена магма, была метасоматизированная литосферная мантия, обогащенная калием и несовместимыми элементами. Позднемиоценчетвертичные вулканы образовались при различной степени плавления субдукционно обогащенной субконтинентальной литосферной мантии. Роль надсубдукционного вещества уменьшается при эволюции вулканизма с течением времени из-за увеличения доли астеносферного компонента в интервале от верхнего миоцена до четвертичного времени.

Ключевые слова: петрогеохимия; позднекайнозойский коллизионный вулканизм; Малый Кавказ; надсубдукционное вещество

Для цитирования: Имамвердиев Н. А. Влияние древнего субдукционного процесса на образование позднеколлизионного вулканизма Малого Кавказа // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 38–41. doi: 10.17076/geo1653

### **N. A. Imamverdiyev. ANCIENT SUBDUCTION PROCESS EFFECT ON THE ORIGIN OF LATE-COLLISION VOLCANISM IN THE LESSER CAUCASUS**

*Baku State University (33 Z. Khalilov St., Baku, Republic of Azerbaijan, Az 1148)*

The article examines the petrogeochemical features of the Late Cenozoic collisional volcanism in the Lesser Caucasus. New geochemical data indicate that Nb, Ta, Hf, and Zr minima are observed for basic and intermediate rocks. Salic rocks are strongly enriched in Rb, Ba, Th, La and depleted in Ti, Yb, Y relative to the primitive mantle. The enrichment in incompatible elements suggests that the source of the melt from which the magma was derived was metasomatized lithospheric mantle enriched in potassium and incompatible elements. Late Miocene-Quaternary volcanics were formed at different degrees of melting of subduction-enriched subcontinental lithospheric mantle. The role of the suprasubduction material decreased in the course of the volcanism evolution due to an increase in the share of the asthenospheric component in the interval from the Upper Miocene to the Quaternary.

Keywords: petrogeochemistry; Late Cenozoic collisional volcanism; Lesser Caucasus; suprasubduction material

For citation: Imamverdiyev N. A. Ancient subduction process effect on the origin of late-collision volcanism in the Lesser Caucasus. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:38–41. doi: 10.17076/geo1653

Позднекайнозойские магматические породы широко распространены в пределах Кавказа и представляют собой важный компонент континентальной коры Альпийско-Гималайского внутриконтинентального орогенного пояса. Время их формирования совпадает с континентальной коллизией в регионе. Согласно современным представлениям, складчатые сооружения Кавказа возникли в результате сближения Афро-Аравийской и Евразийской плит. По мнению Н. В. Короновского и Л. И. Деминой [1999], в Кавказском сегменте Альпийско-Гималайского складчатого пояса позднекайнозойский вулканизм проявился в обстановке субмеридионального сжатия пояса, вызванного ускоренным перемещением в северном направлении Аравийской плиты вследствие раскрытия в среднем миоцене (примерно 15–10 млн лет назад) Красного моря.

В центральной части Малого Кавказа позднекайнозойский вулканизм проявился в двух этапах: позднемиоцен-нижнеплиоценовом и позднеплиоцен-четвертичном. На первом этапе формировалась дифференцированная андезит-дацит-риолитовая формация, на втором – бимодальная ассоциация (риолитовая – слабодифференцированная трахибазальт-трахиандезитовая формация) [Имамвердиев и др., 2017; Imamverdiyev et al., 2017, 2018].

В породах неоген-четвертичные вулканические ассоциации имеют примерно одинаковый характер распределения редких и редкоземельных элементов. На нормированных спайдер-диаграммах для основных и средних пород наблюдаются Nb, Ta, Hf и Zr минимумы. Кроме того, калийные породы сильно обогащены Rb, Ba, Th, La и обеднены Ti, Yb, Y относительно примитивной мантии. Обогащение несовместимыми элементами предполагает, что источником расплава, из которого получена магма, была метасоматизированная литосферная мантия, обогащенная калием и несовместимыми элементами. Наличие Nb-Ta минимума обычно считается характерной чертой надсубдукционного магматизма. В мантийном клине над зоной субдукции K, Rb, Th и La переходит в расплав, а Nb и Ta остается в твердых перидотитовых рестилах, вызывая истощения этими элементами

надсубдукционных магм [Condie, 2001]. Однако наши образцы в отличие от базальтов островных дуг обогащены LILE. Аналогичные геохимические данные наблюдаются и в других постколлизийных областях и широко обсуждались в литературе [Pearce et al., 1990; Keskin, 2003, 2005; Dilek et al., 2010; Имамвердиев и др., 2017, Imamverdiyev et al., 2017, 2018].

Геохимические данные, в частности высокие значения для исследованных пород Th/Nb, Ba/Nb, K/Ti отношений, а также низкие величины Nb/Y и Ti/Y отношений, в сочетании с региональными геологическими данными, показывают, что мантийные источники под Малым Кавказом метасоматизированы более древними субдукционными процессами, в которых содержатся высококалиевые и обедненные HFSE водные флюиды. Габброидные нодулы и наименее дифференцированные базальтоиды миоцен-четвертичного возраста имеют аналогичные составы, указывающие на образование их из обогащенного литосферного мантийного источника.

Субдукционное обогащение исходного расплава миоцен-четвертичного вулканизма региона хорошо отражается на диаграмме Th/Yb-Ta/Yb (рис. 1) [Pearce, 1982], которая отображает изменение отношения источника и влияние коровой контаминации. Как видно из рис. 1, миоцен-четвертичные лавы Малого Кавказа располагаются субпараллельно мантийной линии, но смещены по составам в сторону высоких Th/Yb отношений. Эти данные показывают, что литосферный мантийный источник обогащен субдукционным компонентом. Можно предполагать, что от верхнего миоцена до антропогена вследствие увеличения астеносферного эффекта доля субдукционного компонента уменьшалась.

На рис. 2 видно, что все точки составов пород раннего этапа и калийные породы позднего этапа лежат в поле составов коллизийных магматических пород. Мафические же лавы повышенной щелочности позднего этапа находятся на границе между коллизийными и внутриплитными лавами. Эти данные показывают, что от миоцена до четвертичного времени доля субдукционного компонента уменьшается и увеличивается доля астеносферного мантийного компонента.

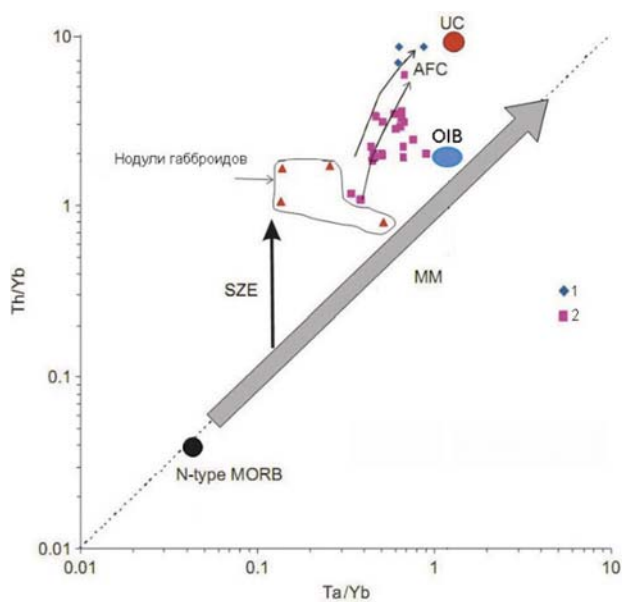


Рис. 1. Th/Yb-Ta/Yb диаграмма [по: Pearce, 1982] для неоген-четвертичных основных и средних пород Малого Кавказа:

1 – ранний этап, 2 – поздний этап, MM – тренд мантийного метасоматоза, SZE – обогащенная субдукционная зона, UC – верхняя кора

Fig. 1. Th/Yb-Ta/Yb diagram [Pearce, 1982] for Neogene-Quaternary mafic and intermediate rocks of the Lesser Caucasus:

1 – early stage, 2 – late stage, MM – mantle metasomatism trend, ESZ – enriched subduction zone, UC – upper crust, OIB – oceanic-island basalts, AFC – assimilation-fractional crystallization, N-MORB – mid-ocean ridge basalts

Итак, полученные петрогеохимические данные показывают, что позднемиоцен-четвертичные вулканы образовались при различной степени плавления субдукционно обогащенной субконтинентальной литосферной мантии. Роль надсубдукционного вещества уменьшается при эволюции вулканизма с течением времени из-за увеличения доли астеносферного компонента в интервале от верхнего миоцена до четвертичного времени.

## Литература

Имамвердиев Н. А., Велиев А. А., Гасангулиева М. Я. Петрология и геохимия позднекайнозойского вулканизма Малого Кавказа. Баку, 2017. 320 с.

Короновский Н. В., Демина Л. И. Коллизионный этап развития Кавказского сектора Альпийского складчатого пояса: геодинамика и магматизм // Геотектоника. 1999. № 2. С. 17–35.

Condie K. C. Mantle plume and their record in Earth history. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 306 p.

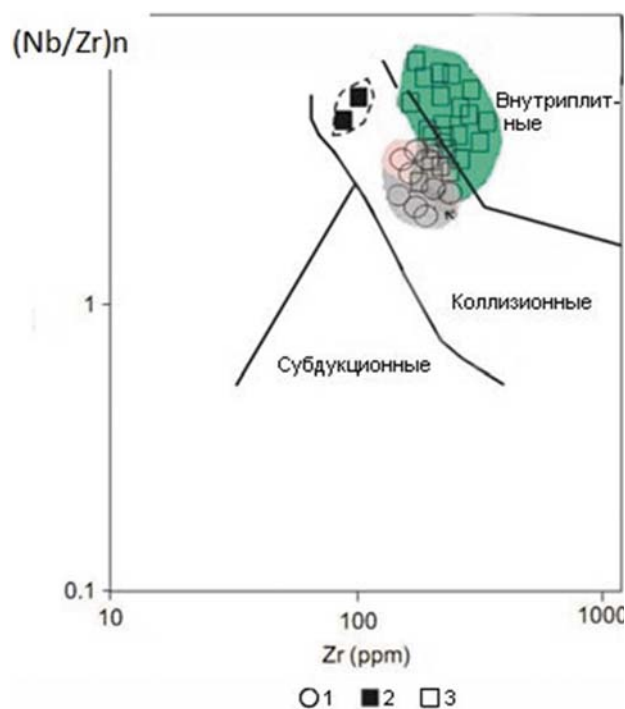


Рис. 2.  $(\text{Nb}/\text{Zr})_n$ -Zr диаграмма [по: Thieblemont, Tegyeu, 1994] для позднекайнозойских вулканических пород Малого Кавказа. Нормировано на N-MORB по: [Pearce, 1982].

1 – ранний этап; 2, 3 – поздний этап (2 – кислые, 3 – мафические)

Fig. 2. N-MORB-normalized [Pearce, 1982]  $(\text{Nb}/\text{Zr})_n$ -Zr diagram [Thieblemont, Tegyeu, 1994] for Late Cenozoic volcanics of the Lesser Caucasus.

1 – early stage; 2, 3 – late stage (2 – felsic, 3 – mafic)

Dilek Y., Imamverdiyev N., Altunkaynak Ş. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint // Int. Geol. Rev. 2010. Vol. 52(4-6). P. 536–578. doi: 10.1080/00206810903360422

Imamverdiyev N. A., Baba-zadeh V. M., Abdullaeva S. F., Roman'ko A. E., Gasangulieva M. Y., Babaeva G. D., Veliev A. A. Formation of the late cenozoic volcanic complexes of the Lesser Caucasus // Geotectonics. 2017. Vol. 51, no. 5. P. 489–498. doi: 10.1134/S0016852117050041

Imamverdiyev N. A., Abdullaeva S. F., Gasangulieva M. Y., Babaeva G. J., Veliev A. A. Petrogenesis of the Late Cenozoic volcanism of the central part of the Lesser Caucasus (Azerbaijan) // Russ. Geol. Geophys. 2018. No. 1. P. 41–54. doi: 10.15372/GiG20180103

Keskin M. Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: an alternative model for collision related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey // Geophys. Res. Lett. 2003. Vol. 30, no. 24. Art. 8046. doi: 10.1029/2003GL018019

Keskin M. Domal uplift and volcanism in a collision zone without a mantle plume: Evidence from Eastern



Anatolia. URL: <http://www.mantleplumes.org/Anatolia.html>. 2005 (дата обращения: 15.08.2022).

Pearce J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries // Thorpe R. S., ed. *Andesites*. New York: Wiley, 1982. P. 525–548.

Pearce J. A., Bender J. F., De Long S. E., Kidd W. S. F., Low P. J., Güner Y., Saroglu F., Yilmaz Y., Moorbath S., Mitchell J. G. Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1990. Vol. 44. P. 189–229. doi: 10.1016/0377-0273(90)90018-B

Thieblemont D., Tegyey M. Une discrimination géochimique des roches différenciées témoin de la diversité d'origine et de situation tectonique des magmas calco-alcalins // *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 1994. Vol. 319, no. II. P. 87–94.

## References

Condie K. C. *Mantle plume and their record in Earth history*. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. 306 p.

Dilek Y., Imamverdiyev N., Altunkaynak Ş. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *Int. Geol. Rev.* 2010;52(4-6):536–578. doi: 10.1080/00206810903360422

Imamverdiyev N. A., Veliyev A. A., Gasangulieva M. Y. Petrology and geochemistry of the late Cenozoic collision volcanism of the Lesser Caucasus. Baku; 2017. 320 p. (In Russ.)

Imamverdiyev N. A., Baba-zadeh V. M., Abdullaeva S. F., Roman'ko A. E., Gasangulieva M. Y., Babaeva G. D., Veliyev A. A. Formation of the late cenozoic volca-

nic complexes of the Lesser Caucasus. *Geotectonics*. 2017;51(5):489–498. doi: 10.1134/S0016852117050041

Imamverdiyev N. A., Abdullaeva S. F., Gasangulieva M. Y., Babaeva G. J., Veliyev A. A. Petrogenesis of the Late Cenozoic volcanism of the central part of the Lesser Caucasus (Azerbaijan). *Russ. Geol. Geophys.* 2018;1:41–54. doi: 10.15372/GiG20180103

Keskin M. Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: an alternative model for collision related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *Geophys. Res. Lett.* 2003;30(24):8046. doi: 10.1029/2003GL018019

Keskin M. Domal uplift and volcanism in a collision zone without a mantle plume: Evidence from Eastern Anatolia. URL: <http://www.mantleplumes.org/Anatolia.html>. 2005 (accessed: 15.08.2022).

Koronovskii N. V., Demina L. I. Collision stage in the evolution of the Caucasian sector of the Alpine Orogenic Belt: Geodynamics and magmatism. *Geotektonika = Geotectonics*. 1999;2:17–35. (In Russ.)

Pearce J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. *Thorpe R. S., ed. Andesites*. New York: Wiley; 1982. P. 525–548.

Pearce J. A., Bender J. F., De Long S. E., Kidd W. S. F., Low P. J., Güner Y., Saroglu F., Yilmaz Y., Moorbath S., Mitchell J. G. Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1990;44:189–229. doi: 10.1016/0377-0273(90)90018-B

Thieblemont D., Tegyey M. Une discrimination géochimique des roches différenciées témoin de la diversité d'origine et de situation tectonique des magmas calco-alcalins. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 1994;319(II):87–94.

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Имамвердиев Назим Аждар

д-р геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая и историческая геология»

e-mail: [inazim17@yahoo.com](mailto:inazim17@yahoo.com); [nazimimmamverdiyev@bsu.edu.az](mailto:nazimimmamverdiyev@bsu.edu.az)

## CONTRIBUTOR:

### Imamverdiyev, Nazim Ajdar

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Head of Department

УДК 552.08+552.125

## ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ РАССЛОЕННЫЙ МАССИВ ЯРВА-ВАРАКА (КОЛЬСКИЙ РЕГИОН) – ВОЗМОЖНАЯ АСТРОБЛЕМА

**Т. В. Каулина<sup>1\*</sup>, Л. И. Нерович<sup>1</sup>, В. И. Бочаров<sup>2</sup>,  
В. В. Шиловских<sup>2</sup>, В. Л. Ильченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Геологический институт Кольского научного центра РАН (ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Россия, 184209), \*kaulina@geoksc.apatity.ru

<sup>2</sup> Ресурсный центр «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета (ул. Ульяновская, 1, Санкт-Петербург, Россия, 198504)

Рассмотрены признаки ударного метаморфизма в породах и минералах расслоенного массива Ярва-варака и его обрамления. Массив расположен в Мончегорском рудном районе Кольского региона. К признакам импактного генезиса массива относятся псевдотахилитовая брекчия, структуры смятия в биотите и клиноцоизите, планарные деформации в кварце, диаплектовые стекла циркона, силлиманита и плагиоклаза, деформационные микроструктуры в монаците. Совокупность имеющихся признаков позволяет предполагать импактное происхождение массива Ярва-варака около 2,5 млрд лет назад.

Ключевые слова: астроблемы; импактные структуры; ударный метаморфизм; докембрий; Мончегорский рудный район

Для цитирования: Каулина Т. В., Нерович Л. И., Бочаров В. И., Шиловских В. В., Ильченко В. Л. Палеопротерозойский расслоенный массив Ярва-варака (Кольский регион) – возможная астроблема // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 42–45. doi: 10.17076/geo1665

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ГИ КНЦ РАН по теме НИР № АААА-А19-119100290148-4, FMEZ-2022-0025 с использованием оборудования ресурсного центра «Геомодель» научного парка СПбГУ.

**T. V. Kaulina<sup>1\*</sup>, L. I. Nerovich<sup>1</sup>, V. I. Bocharov<sup>2</sup>, V. V. Shilovskikh<sup>2</sup>, V. L. Il'chenko<sup>1</sup>.  
PALEOPROTEROZOIC LAYERED JARVA-VARAKA MASSIF (KOLA REGION) –  
A PROBABLE ASTROBLEME**

<sup>1</sup> Geological Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14 Fersman St., 184209 Apatity, Russia), \*kaulina@geoksc.apatity.ru

<sup>2</sup> Resource Center for Geo-Environmental Research and Modeling of the St. Petersburg State University (1 Ulyanovskaya St., 198504 Saint Petersburg, Russia)

Signs of shock metamorphism in rocks and minerals of the layered Jarva-Varaka massif and its framing are described. The massif is located in the Monchegorsk ore district of the Kola region. Signs of the impact genesis of the massif include pseudotachylite breccia, “kink-banding” structures in biotite and clinozoisite, planar deformations in quartz, diaplectic glasses of zircon, sillimanite, and plagioclase, and deformation microstructures in monazite. The totality of available features allows us to assume the impact origin of the Jarva-Varaka massif ca. 2.5 Ga ago.

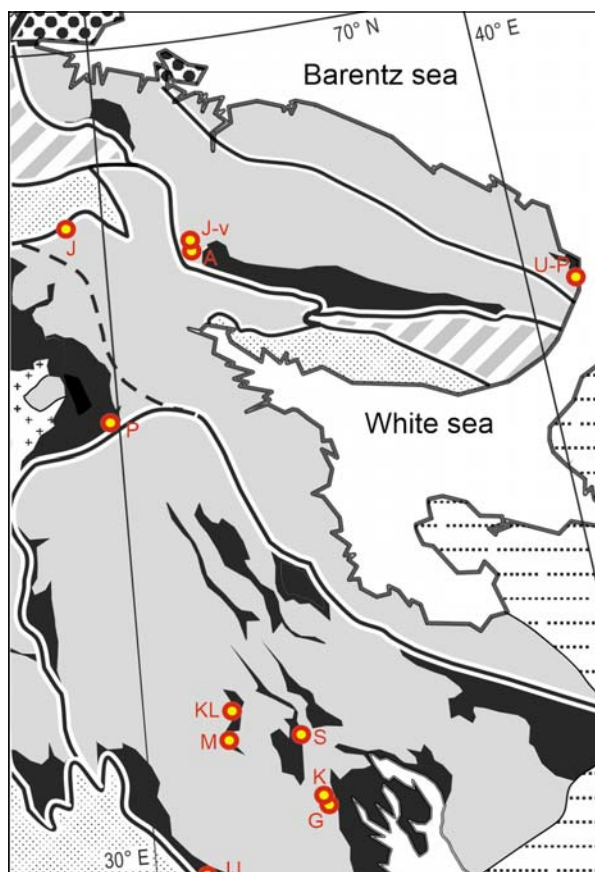
**Keywords:** astroblemes; impact structures; shock metamorphism; Precambrian; Monchegorsk ore district

**For citation:** Kaulina T. V., Nerovich L. I., Bocharov V. I., Shilovskikh V. V., Il'chenko V. L. Paleoproterozoic layered Jarva-Varaka massif (Kola Region) – a probable astrobleme. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:42–45. doi: 10.17076/geo1665

**Funding.** The study was carried out under state assignment to the Geological Institute of the Kola Science Centre RAS within the research theme # AAAA-A19-119100290148-4, FMEZ-2022-0025 using equipment of the Geomodel Resource Center of the St. Petersburg State University Science Park.

Исследования возможных космогенных структур на Балтийском щите, которые проводились в 1980-е годы сотрудниками ВСЕГЕИ, позволили выделить в Карело-Кольском регионе несколько потенциально алмазоносных предположительно импактных структур: Арваренч, Усть-Поной, Панаярви, Кумса и Гирвас, Мотко, Келярви (рис.). В настоящее время в Карелии известны две импактные структуры: Янисъярви возраста  $725 \pm 5$  млн лет [Вишневский и др., 2002] и Суавъярви возраста  $\sim 2400$  млн лет [Mashchak, Naumov, 2012]. В Кольском регионе импактное происхождение предполагается для Яврозерской кольцевой структуры [Kaulina et al., 2021] и расслоенного массива Ярва-варака [Нерович и др., 2020] (рис.).

Расслоенный массив Ярва-варака расположен в Мончегорском рудном районе (рис.) и представляет собой интрузивное тело  $1,7 \times 2,2$  км, мощностью до 2 км. Геолого-петрографическое и петрогеохимическое изучение пород массива [Нерович и др., 2020 и ссылки в ней] показало его сходство с массивом Садбери, для которого доказано импактное происхождение. Одним из основных критериев сходства являлось наличие гранофилов (микропегматита) по всему разрезу Ярва-вараки, что свидетельствует о существенной коровой контаминации, и среди большинства расслоенных интрузий мира подобный разрез наблюдается только в магматическом комплексе Садбери. В ходе дальнейшего изучения в породах обрамления массива Ярва-варака были обнаружены следующие признаки ударного метаморфизма: псевдотачилитовая брекчия с грис-структурой (брекчия в брекчии); полосы смятия в биотите и клиноцоизите; планарные структуры в квар-



Карта Карело-Кольского региона с местоположением предполагаемых астроблем:

A – Арваренч, J-v – Ярва-варака, J – Яврозеро, JJ – Янисъярви, G – Гирвас, KI – Келярви, K – Кумса, M – Мотко, P – Панаярви, S – Суавъярви, U-P – Усть-Поной

Map of the Karelia-Kola region with the location of the alleged astroblemes:

A – Arvarench, J-v – Jarva-varaka, J – Yavrozero, JJ – Janisjärvi, G – Girvas, KI – Kelyarvi, K – Kumsa, M – Motko, P – Panayarvi, S – Suavyarvi, U-P – Ust-Ponoi

це [Нерович и др., 2020]; диаплектовые стекла циркона, плагиоклаза и силлиманита [Kaulina et al., 2021]; деформационные микроструктуры в монаците.

Образование брекчии в брекчии обычно связывают с неравномерно проявленным дроблением импактированных пород. При микронзондовом исследовании установлена криптокристаллическая структура цемента брекчии, которая характерна и для других псевдотахилитов мира. Полосы смятия и излома, структура «kink banding», типичны для минералов в гнейсах основания Садбери. При этом если полосы смятия в биотите могут быть связаны с деформацией, то полосы смятия в клиноцоизите являются признаком импакта [Trepmann, Spray, 2006]. Образование диаплектовых стекол циркона и плагиоклаза происходит при температуре 1300–1500 °С и давлении выше 30 ГПа [Stöffler et al., 1986; Wittmann et al., 2006]. В монаците из гранито-гнейсов обрамления массива Ярва-варака обнаружены деформационные микроструктуры с образованием двойников и новообразованных участков локальной перекристаллизации, которые описаны и в монаците из импактных структур Вредефорт и Яррабубба [Erickson et al., 2016 и ссылки в ней].

Не все полученные данные однозначно указывают на импактное происхождение массива Ярва-варака, многие из вышеприведенных структур характерны и для эндогенных процессов [French, Koeberl, 2010], тем не менее совокупность имеющихся признаков позволяет с большой долей вероятности говорить об импактном происхождении массива Ярва-варака. Датирование циркона и бадделеита из пижонит-авгитовых диоритов массива Ярва-варака (SHRIMP-II, ЦИИ ВСЕГЕИ) определило возраст кристаллизации пород в  $2498 \pm 6$  млн лет. Геохронологические данные вместе с признаками импактного происхождения массива позволяют говорить, что на сегодняшний день массив Ярва-варака является древнейшей из известных астроблем на Балтийском щите.

## Литература

Вишневский С. А., Пальчик Н. А., Мороз Т. Н., Леонова И. В. Ударно метаморфизованное углеродистое вещество в импактиках астроблемы Янисъярви, Карелия // ДАН. 2002. Т. 387, №. 5. С. 674–677.

Нерович Л. И., Ильченко В. Л., Каулина Т. В., Базай А. В., Кунаккузин Е. Л., Мудрук С. В., Борисенко Е. С., Сосновская М. А. Первая находка псевдотахилитовой брекчии и другие признаки ударного метаморфизма в породах обрамления массива Ярва-варака (Мончегорский рудный район) // Труды

Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 384–389. doi: 10.31241/FNS.2020.17.073

Erickson T. M., Cavosie A. J., Pearce M. A., Timms N. E., Reddy S. M. Empirical constraints on shock features in monazite using shocked zircon inclusions // *Geology*. 2016. Vol. 44(8). P. 635–638. doi: 10.1130/G37979.1

French B. M., Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why // *Earth-Science Rev.* 2010. Vol. 98. P. 123–170. doi: 10.1016/j.earscirev.2009.10.009

Kaulina T. V., Nerovich L. I., Il'chenko V. L., Lialina L. M., Kunakkuzin E. L., Ganninbal M. A., Mudruk S. V., Elizarov D. V., Borisenko E. S. Astroblems in the early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic shield) // *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth. Springer Natural Hazards*. Springer, Singapore, 2021. doi: 10.1007/978-981-16-4122-0\_3

Mashchak M. S., Naumov M. V. The Suavjärvi impact structure, NW Russia // *Meteorit. Planet. Sci.* 2012. Vol. 47, no. 10. P. 1644–1658. doi: 10.1111/j.1945-5100.2012.01428.x

Trepmann C. A., Spray J. G. Shock-induced crystal-plastic deformation and post-shock annealing of quartz: microstructural evidence from crystalline target rocks of the Charlevoix impact structure, Canada // *Eur. J. Mineral.* 2006. No. 18. P. 161–173. doi: 10.1127/0935-1221/2006/0018-0161

Stöffler D., Ostertag R., Jammes C., Pfannschmidt G. Shock metamorphism and petrology of the Shergotty achondrite // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1986. Vol. 50. P. 889–903.

Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R. T., Stöffler D. Shock-metamorphosed zircon in terrestrial impact craters // *Meteorit. Planet. Sci.* 2006. Vol. 41, no. 3. P. 433–454. doi: 10.1111/j.1945-5100.2006.tb00472.x

## References

Erickson T. M., Cavosie A. J., Pearce M. A., Timms N. E., Reddy S. M. Empirical constraints on shock features in monazite using shocked zircon inclusions. *Geology*. 2016;44(8):635–638. doi: 10.1130/G37979.1

French B. M., Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Rev.* 2010;98:123–170. doi: 10.1016/j.earscirev.2009.10.009

Kaulina T. V., Nerovich L. I., Il'chenko V. L., Lialina L. M., Kunakkuzin E. L., Ganninbal M. A., Mudruk S. V., Elizarov D. V., Borisenko E. S. Astroblems in the early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic Shield). *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth. Springer Natural Hazards*. Springer, Singapore; 2021. doi: 10.1007/978-981-16-4122-0\_3

Mashchak M. S., Naumov M. V. The Suavjärvi impact structure, NW Russia. *Meteorit. Planet. Sci.* 2012;47(10):1644–1658. doi: 10.1111/j.1945-5100.2012.01428.x

Nerovich L. I., Il'chenko V. L., Kaulina T. V., Bazay A. V., Kunakkuzin E. L., Mudruk S. V., Borisenko E. S., Sos-

novskaya M. A. The first find of pseudotachylite breccia and other signs of shock metamorphism in the country rocks of the Jarva-Varaka Massif (Monchegorsk Ore District). *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN = Proc. Fersman Sci. Session GI KSC RAS*. 2020; 17:384–389. doi: 10.31241/FNS.2020.17.073 (In Russ.)

Trepmann C. A., Spray J. G. Shock-induced crystal-plastic deformation and post-shock annealing of quartz: microstructural evidence from crystalline target rocks of the Charlevoix impact structure, Canada. *Eur. J. Mineral.* 2006;18:161–173. doi: 10.1127/0935-1221/2006/0018-0161

Stöffler D., Ostertag R., Jammes C., Pfannschmidt G. Shock metamorphism and petrology of the Shergotty achondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1986;50:889–903.

Vishnevsky S. A., Pal'chik N. A., Moroz T. N., Leonova I. V. Shock metamorphism of carbonaceous matter in impactites of the Yanisjärvi Astrobleme, Karelia. *Doklady Earth Sciences*. 2002;387(9):1024–1027.

Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R. T., Stöffler D. Shock-metamorphosed zircon in terrestrial impact craters. *Meteorit. Planet. Sci.* 2006;41(3):433–454. doi: 10.1111/j.1945-5100.2006.tb00472.x

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Каулина Татьяна Владимировна**

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

*e-mail: kaulina@geoksc.apatity.ru*

**Нерович Людмила Ивановна**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: nerovich@geoksc.apatity.ru*

**Бочаров Владимир Николаевич**

специалист

*e-mail: bocharov@molsp.phys.spbu.ru*

**Шиловских Владимир Владимирович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: vvshlvskh@gmail.com*

**Ильченко Вадим Леонидович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: vadim@geoksc.apatity.ru*

### CONTRIBUTORS:

**Kaulina, Tatyana**

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

**Nerovich, Lyudmila**

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

**Bocharov, Vladimir**

Specialist

**Shilovskikh, Vladimir**

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

**Il'chenko, Vadim**

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

УДК 551.251:551.24

## **СЕВЕРО-ЕНИСЕЙСКИЙ ОРОГЕН (ЗАПАДНАЯ ОКРАИНА СИБИРСКОГО КРАТОНА): ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ТЕКТОНО-МЕТАМОРФИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**П. С. Козлов**

*Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН (ул. Академика Вонсовского, 15, Екатеринбург, Россия, 620016)*

Впервые в докембрийском складчатом обрамлении на западе Сибирского кратона выделен Северо-Енисейский ороген. На основании комплекса методов, полицикличности и эволюции тектоно-метаморфических и магматических комплексов установлены основные этапы его формирования (на рубежах, млрд лет): 1) гренавилльский (1,18–0,85), 2) деструкции гренавиллид (на западе, 1,18–0,80) и 3) байкальский (вальгальский) орогенез (на востоке, 0,80–0,60).

Ключевые слова: Северо-Енисейский ороген; докембрий; тектоно-метаморфические комплексы

Для цитирования: Козлов П. С. Северо-Енисейский ороген (западная окраина Сибирского кратона): этапы формирования и тектоно-метаморфическая эволюция докембрийских комплексов // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 46–49. doi: 10.17076/geo1651

Финансирование. Работа выполнена за счет средств ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, АААА-А18-118052590032-6) и Российского научного фонда, проект № 21-77-20018.

## **P. S. Kozlov. NORTH YENISEI OROGEN (WEST SIBERIAN CRATON): GENETIC STAGES AND TECTONO-METAMORPHIC EVOLUTION OF PRECAMBRIAN FORMATIONS**

*A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (15 Acad. Vonsovsky St., 620016 Yekaterinburg, Russia)*

For the first time, the North Yenisei Orogen was identified in the Precambrian folded frame in the west of the Siberian Craton. Based on a set of methods, polycyclicality and evolution of tectonic-metamorphic and magmatic complexes, the main stages of its formation were outlined (at boundaries, Ga): (1) Grenville stage (1.18–0.85), (2) Grenvillid destruction stage (in the west, 1.18–0.80) and (3) Baikal (Valgalian) orogeny (in the east, 0.80–0.60).

Keywords: North Yenisei Orogen; Precambrian; tectonic-metamorphic complexes

For citation: Kozlov P. S. North Yenisei Orogen (West Siberian Craton): genetic stages and tectono-metamorphic evolution of Precambrian formations. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:46–49. doi: 10.17076/geo1651

Funding. The study was funded by the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS (Yekaterinburg, AAAA-A18-118052590032-6) and Russian Science Foundation grant # 21-77-20018.

Ключевой проблемой для периода 1,2–0,6 млрд лет назад на западе Сибирского кратона (СК) являются слабоисследованные вопросы реконструкции и фиксирования возрастных рубежей гренвилльской и байкальской орогенических эпох, связанные с глобальными тектоническими событиями. Расхождение взглядов на тектоническую природу Северо-Енисейского кряжа (СЕК) [Верниковский, Верниковская, 2006; Лиханов и др., 2014; Kuz'michev, Sklyarov, 2016 и др.] связано с недоизученностью петрологических индикаторов геодинамических обстановок и изотопного датирования докембрийских магматических и тектоно-метаморфических комплексов (ТМК). Новые данные по составу и эволюции магматических и метаморфических комплексов региона позволяют предложить новую модель.

В строении континентальной коры региона выделены палеоконтинентальный (ПКС) и палеоокеанический сектора. Согласно рифтогенно-коллизивной модели эволюции докембрийских комплексов, в формировании Северо-Енисейского орогена (СЕО) на западе СК выделяется три этапа: 1) гренвилльский (1,18–0,85 млрд лет); 2) деструкции гренвиллид (на западе, 1,18–0,80 млрд лет); 3) байкальский (вальгальский) [Лиханов и др., 2015] (0,80–0,60 млрд лет).

1) Гренвилльский этап (1,18–0,85 млрд лет) коррелируется с временем формирования гипотетического суперконтинента Родиния [Богданова и др., 2009]. Петрологическими и геодинамическими индикаторами становления СЕО на гренвилльском этапе являются полиметаморфические комплексы ПКС (Гаревский, Тейский, Приангарский). Регионально-метаморфизованные породы Анд-Сил типа, Тейский и Гаревский гранитоидные купола с возрастными ~ 1,1 и 0,85 млрд лет [Ножкин, 1999] и неопротерозойские гранитоиды (Тейский, Ахтинский, Татарский и др. комплексы) обнажены в Центральном, Приенисейском и Кулаковском поднятиях (антиклинориях). Становление комплексов сопровождалось региональным Анд-Сил LP/HT метаморфизмом (1,18–0,90 млрд лет) осадочных палеопротерозой-мезопроте-

розойских толщ [Лиханов и др., 2014 и ссылки в ней]. Постгренвилльский Ки-Сил MP/LT коллизивный (дислокационный) метаморфизм проявился в Ишимбинско-Татарской сдвиговой зоне надвигами западной (0,85 млрд лет) и восточной (0,80 млрд лет) вергентности. Тейский и Гаревский ТМК сформировались в процессе утолщения земной коры. Они отличаются структурно-геологической позицией, геотермическими градиентами, P-T условиями, режимами давления, имеют близкие возрасты проградного полиметаморфизма. Итоговые P-T-t тренды метаморфизма приведены в [Лиханов, 2020].

2) Этап деструкции гренвиллид (на западе, 1,18–0,80 млрд лет) – этап распада Родинии и ранней стадии образования Палеоазиатского океана (ПАО) [Богданова и др., 2009] на рубеже около 1 млрд лет назад [Kuz'michev, Sklyarov, 2016; Ножкин и др., 2021] и его закрытия в эдиакарии. Индикаторы геодинамической обстановки растяжения коры, возможно, связанные с распадом Родинии [Козлов и др., 2020], зафиксированы в Приенисейской сдвиговой зоне ПКС в пределах Гаревского метакомплекса: рапакивиподобные метакристаллы (0,87 млрд лет, U-Pb, циркон), бимодальный дайковый пояс (0,80 млрд лет, U-Pb, циркон) [Лиханов и др., 2014], рифтогенная метапикрит-базальтовая ассоциация в основании Ангаро-Большепитского палеобассейна на рубеже мезо-неопротерозоя [Ножкин и др., 2021], свидетельствующие о наложении деформаций и сопутствующего магматизма на поздние гренвиллиды.

Раскрытие ПАО обосновано наличием неопротерозойских метаофиолитов [Верниковский, Верниковская, 2006; Kuz'michev, Sklyarov, 2016 и ссылки в этих работах] островодужных комплексов, позволяющих реконструировать субдукцию восточной вергентности, а также реликтов метаморфизма глаукофановой фации [Лиханов и др., 2019].

3) Байкальский (вальгальский, пики 0,81–0,79 и 0,73–0,71 млрд лет) орогенез (0,80–0,60 млрд лет) в западной части сопровождается коллизией Касско-Туруханского микроконтинента с СК [Козлов и др.,

2020]. Об этом свидетельствует 0,62 млрд лет ( $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  метод по амфиболу), высокобарический (НР/НТ) метаморфизм (бластомилониты по базитам) и 0,63–0,64 млрд лет НР/ЛТ с реликтами глаукофана [Лиханов и др., 2021]. Субдукция завершается расщеплением океанических комплексов и частичной обдукцией их на СК, образованием орогена окраинно-континентального типа и латеральным наращиванием континентальной коры Сибирского кратона (0,64–0,60 млрд лет) [Лиханов и др., 2014 и ссылки в ней; Козлов и др., 2020; Ножкин и др., 2021]. Столкновение океанического блока с СК 0,63–0,60 млрд лет ( $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ , слюды, амфибол) контролируется зонами фронтальных МР/ЛТ и МР/НТ бластомилонитов – метаморфическими индикаторами зон сжатия и деформаций сдвига СЗ простирания [Лиханов и др., 2021].

В этот период в Восточном блоке СЕК происходило формирование рифтогенных прогибов и грабенов (Уволжский, Чапский и др.) Ангаро-Тисского и Ангаро-Питского синклиналиев, низкотемпературный метаморфизм погружения осадочных толщ тунгусикской и ослянской серий и локальных зон бластомилонитов. Становление Северо-Енисейского орогена завершается около 600 млн лет назад, далее следует платформенный этап развития.

Период геологического развития СЕК в интервале 1,2–0,6 млрд лет назад на западной окраине СК завершается ростом континентальной литосферы и 3-этапным образованием Северо-Енисейского орогена окраинно-континентального типа на неoarхей?-палеопротерозойской коре СК. Полученные результаты, по сравнению с другими тектоническими моделями [например, Верниковский, Верниковская, 2006; Kuz'michev, Sklyarov, 2016], свидетельствуют о высокой эндогенной активности западной периферии СК в позднем докембрии [Ножкин, 1999; Лиханов и др., 2014 и др.] и дают новое представление о геологических процессах, сформировавших докембрийскую покровно-складчатую структуру Северо-Енисейского кряжа.

## 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.

Верниковский В. А., Верниковская А. Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 1. С. 35–52.

Козлов П. С., Филиппов Ю. Ф., Лиханов И. И., Ножкин А. Д. Геодинамическая модель эволюции

Приенисейской палеосубдукционной зоны в неопротерозое (западная окраина Сибирского кратона), Россия // Геотектоника. 2020. Т. 54, № 1. С. 62–78. doi: 10.1134/S0016853X20010063

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., 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. 41–65. doi: 10.31857/S0016853X21010070

Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Козлов П. С. Гренвильские 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., Ножкин А. Д., Савко К. А., Крылов А. А., Зиновьев С. В. Первые петрологические свидетельства субдукции на западной окраине Сибирского кратона // ДАН. 2019. Т. 484, № 2. С. 209–214. doi: 10.31857/S0869-56524842209-214

Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С., Зиновьев С. В., Хиллер В. В. Свидетельства вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона // ДАН. 2015. Т. 462, № 1. С. 73–78. doi: 10.15372/GiG20150601

Ножкин А. Д. Раннепротерозойские окраинно-континентальные комплексы Ангарского складчатого пояса и особенности их металлогении // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 11. С. 1524–1544.

Ножкин А. Д., Козлов П. С., Лиханов И. И., Зиновьев С. В., Крылов А. А. Раннепротерозойская метапикрит-базальтовая ассоциация приангарской части Енисейского кряжа: петрогеохимический состав, обстановки образования и Pb-Zn рудоносность // Геохимия. 2021. Т. 66, № 5. С. 387–406. doi: 10.31857/S001675252105006X

Kuz'michev A. B., Sklyarov E. V. The Precambrian of Transangaria, Yenisey Ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, Grenville-age orogeny, or reworked margin of the Siberian craton // J. Asian Earth Sci. 2016. Vol. 115. P. 419–441.

## 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;17:259–274. doi: 10.1134/S0869593809030022

Kozlov P. S., Filippov Yu. F., Likhonov I. I., Nozhkin A. D. Geodynamic model of the Neoproterozoic evolution of the Yenisei paleosubduction zone (western margin of the Siberian Craton), Russia. *Geotectonics*. 2020;54(1):54–67. doi: 10.1134/S0016852120010069

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



Likhanov I. I., Kozlov P. S., Zinoviev S. V. 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., 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., Nozhkin A. D., Savko K. A., Krylov A. A., Zinov'ev S. V. First petrological evidence of subduction at the western margin of the Siberian Craton. *Doklady Earth Sciences*. 2019;484(2):209–214. doi: 10.31857/S0869-56524842209-214 (In Russ.)

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Zinoviev S. V., Khiller V. V. Evidence of the Valhalla tectonic events at the western margin of the Siberian Craton.

*Doklady Earth Sciences*. 2015;462(1):458–462. doi: 10.1134/S1028334X15050062

Nozhkin A. D. Early Proterozoic continent-marginal complexes of the Angara fold belt and their metallogeny. *Russ. Geol. Geophys.* 1999;40(11):1501–1521.

Nozhkin A. D., Kozlov P. S., Likhanov I. I., Zinoviev S. V., Krylov A. A. Early Neoproterozoic metapicrite-basalt association of the Angara region, Yenisei Ridge: petrogeochemical composition, tectonic settings, and Pb-Zn mineralization. *Geochem. Int.* 2021;59(5):455–473. doi: 10.1134/S0016702921050062

Kuz'michev A. B., Sklyarov E. V. The Precambrian of Transangaria, Yenisey Ridge (Siberia): Neoproterozoic microcontinent, Grenville-age orogeny, or reworked margin of the Siberian craton. *J. Asian Earth Sci.* 2016;115:419–441. doi: 10.1016/j.jseaes.2015.10.017

Vernikovskiy V. A., Vernikovskaya A. E. Tectonics and evolution of the granitoid magmatism in the Yenisei Ridge. *Russ. Geol. Geophys.* 2006;47:32–50.

Поступила в редакцию / received: 18.08.2022; принята к публикации / accepted: 31.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

##### **Козлов Павел Сергеевич**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории региональной геологии и геотектоники

e-mail: kozlov@igg.uran.ru; geoco2012@yandex.ru

#### **CONTRIBUTOR:**

##### **Kozlov, Pavel**

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

УДК 551.24+551.71+550.4

## ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Н. Е. Козлов<sup>1\*</sup>, Н. О. Сорохтин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт Кольского научного центра РАН (ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Россия, 184209), \*kozlov.n.e@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997)

Описаны методы реконструкции условий формирования протолитов древнейших комплексов, позволяющие вводить поправку на химическую эволюцию вещества Земли и дающие возможность при геодинамических реконструкциях в докембрии более корректно оперировать понятием тенденций изменения режимов, не проводя полных аналогий с фанерозоем, а также методы поиска единого тренда эволюции состава для нескольких изначально заданных последовательностей объектов. Возможности этих методов проиллюстрированы на примере изучения архейских комплексов Кольского региона.

Ключевые слова: докембрий; методы геодинамических реконструкций; поиск трендов отличий

Для цитирования: Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О. Возможности и ограничения петрогеохимических методов при изучении истории развития докембрийских комплексов // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 50–54. doi: 10.17076/geo1659

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке тем НИР ГИ КНЦ РАН и ИО РАН (FMEZ-2022-0025, FMWE-2021-0004).

## N. E. Kozlov<sup>1\*</sup>, N. O. Sorokhtin<sup>1,2</sup>. POSSIBILITIES AND CONSTRAINTS OF PETROGEOCHEMICAL METHODS IN THE STUDY OF PRECAMBRIAN COMPLEX EVOLUTION HISTORY

<sup>1</sup> Geological Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences (14 Fersman St., 184209 Apatity, Russia), \*kozlov.n.e@yandex.ru

<sup>2</sup> P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36 Nakhimovsky Ave., 117997 Moscow, Russia)

The paper describes methods for reconstructing the formation settings for protoliths of ancient complexes that facilitate adjustment to the chemical evolution of the Earth matter and enable a more correct application of the concept of trends in regime changes in geodynamic reconstructions of the Precambrian, avoiding full analogies with the

Phanerozoic. In addition, we describe methods for finding a common trend in the compositional evolution for several given sequences of objects. Possibilities of these methods are demonstrated using the example of Archaean complexes in the Kola region.

Keywords: Precambrian; geodynamic reconstruction methods; search for difference trends

For citation: Kozlov N. E., Sorokhtin N. O. Possibilities and constraints of petro-geochemical methods in the study of Precambrian complex evolution history. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:50–54. doi: 10.17076/geo1659

Funding. The study was carried out within government-funded research themes of the Geological Institute KSC RAS and Institute of Oceanology RAS (FMEZ-2022-0025, FMWE-2021-0004).

Геология докембрия имеет свои особые черты, связанные со специфичностью этого периода, поэтому ее изучение требует привлечения не только традиционных, апробированных на фанерозойских объектах методов, но и иных подходов, иногда различных даже при исследовании отдельных периодов длительной докембрийской истории. Авторы настоящей работы занимаются данной проблемой достаточно давно [Козлов, 1995; Козлов и др., 1999, 2014, 2017; Kozlov et al., 2018; Sorokhtin et al., 2020 и др.]. Наиболее важная особенность нашего подхода к ее решению – все методы расчетов, построения и т. д. основаны на математических законах и строгих методах обработки данных. Это позволяет, по крайней мере на исходной стадии, до интерпретации результатов, работать с объективной информацией.

Кроме того, сопоставление вещественного состава пород проводится нами в многомерном пространстве, где границы, разделяющие поля фигуративных точек пород, достаточно устойчивы. Сравнение объектов таким способом является более корректным, позволяя дать математически обоснованный ответ на вопрос, к какому из эталонов наиболее близок наш исследуемый объект, не будучи, строго говоря, идентичным ни одному из них. И, наконец, нами разработан метод поиска единого тренда для нескольких изначально заданных последовательностей объектов [Козлов и др., 2014; Sorokhtin et al., 2020], что позволяет определять на нем место любого иного объекта, ранее не использованного в качестве основы для его поиска.

Следует напомнить, что между составом базальтов фанерозоя и метабазальтов докембрия нами были выявлены устойчивые системные отличия [Козлов и др., 1999]. Таким образом, процессы химической эволю-

ции вещества в ходе геологического времени накладывают ограничения на использование принципа актуализма при изучении раннедокембрийских комплексов. Поэтому при проведении параллелей между докембрийскими и фанерозойскими породными комплексами необходимо исходить из предположения о специфичности докембрийского периода развития планеты, с одной стороны, и некоторой общности в характере реализации геодинамических обстановок на всем протяжении геологической истории, с другой. Данный подход был сформулирован ранее [Козлов, 1995] как положение о гомологичных рядах геодинамических режимов, что реализуется при изучении раннедокембрийских комплексов древнейших щитов.

По нашему мнению, для получения достоверных результатов при сопоставлении состава древнейших породных ассоциаций и фанерозойских гомологов необходим учет отличий состава докембрийских образований относительно фанерозойских эталонов (то есть в данном случае «смещения» состава докембрийских метабазальтов в многомерном пространстве относительно базальтов фанерозоя) и только после этого – поиск эталона, максимально сходного с исследуемым объектом. В этой связи значительный интерес при решении задач реконструкции представляют теоретические данные, количественно описывающие эволюционные процессы. Методика учета информации о возможной петрогеохимической эволюции мантии, значимо повышающая достоверность реконструкций, описана ранее [Козлов и др., 2017].

В то же время использование этой информации о петрогеохимической эволюции мантии носит в определенной мере субъективный характер, поскольку характеристики исследуемого объекта вычисляются по формуле:

$X^* = \{x_i + \beta \cdot v\}$  ( $i = 1, \dots, n$ ), где  $v$  – вектор «смещения» химического состава мантии во времени, а  $\beta$  – некоторый коэффициент, который вычисляется в интерактивном режиме, характеризуя отличия по химизму состава мантии от пород основного состава в выбранный момент времени и изменяясь в зависимости от этого.

С учетом изложенного для реконструкции раннедокембрийских геодинамических режимов был разработан дополнительный метод, более эффективный в сравнении с теми, которые использовались авторами ранее [Kozlov et al., 2018; Sorokhtin et al., 2020]. Смещение объектов докембрия относительно эталонов фанерозоя в признаковом пространстве (объекты докембрия и эталоны фанерозоя, представленные множествами фигуративных точек) предлагается описывать при помощи поверхности второго порядка, разделяющей совокупности объектов докембрия и фанерозоя. Критерием того, что эта поверхность является разделяющей, служит статистическая значимость отличия между множествами фигуративных точек каждого объекта с множествами проекций этих точек на вышеуказанную поверхность, при том что множества фигуративных точек объектов докембрия и фанерозоя расположены по разные стороны этой поверхности. Используется оптимальная разделяющая поверхность, для которой минимальная близость всей совокупности объектов к поверхности – максимальна.

Тем не менее и этот метод не всегда позволяет давать однозначный ответ об отнесении геодинамической обстановки формирования протолитов некоторых из исследованных докембрийских комплексов к какому-либо одному конкретному типу. В связи с чем наиболее корректным мы полагаем описание тех или иных тенденций эволюции этих обстановок.

Еще одной проблемой, которая часто стоит перед исследователями раннедокембрийских комплексов, является поиск линейного упорядочения геологических объектов (например, по времени формирования протолитов слагающих их пород) на основе заданного отношения частичного порядка. Чтобы перейти от частичного порядка к линейному, был предложен следующий метод: находится линейный тренд  $F$  из условия наилучшего (статистически значимого) относительно рангового критерия Пури – Сена – Тамуры) разделения совокупностей проекций химических составов пород изучаемых структур (многомерных величин) на этот тренд [Sorokhtin et al., 2020].

Этот метод был использован при решении задачи поиска возможного тренда изменения состава архейских пород от более молодых к

более древним для структур Кольского полуострова [Kozlov et al., 2018]. В сочетании с методом реконструкции геодинамических режимов формирования протолитов исследованных комплексов пород при помощи поверхности второго порядка, разделяющей объекты докембрия и фанерозоя, эти исследования позволили установить тенденцию смены режимов, по петрогеохимическим характеристикам наиболее сходных с траппами, режимами, более близкими к континентальным рифтам и затем к островодужным [Kozlov et al., 2018]. Данная ситуация не является исключением. Так, подобная смена плюмового магматизма субдукционным в пределах одного региона ограниченной площади описана, к примеру, для более молодых комплексов Центральной и Восточной Арктики [Добрецов и др., 2013].

Другим примером результативности использования наших методик может служить изучение Кейвского террейна. Проведенные в пределах Кейвского микроконтинента исследования показали, что в неоархее он был погружен на некоторую глубину надвинувшимися на него соседними континентальными доменами коры Кольского региона [Sorokhtin et al., 2020]. В результате этого Кейвский микроконтинент можно считать одним из древнейших срединных массивов докембрийской континентальной коры.

Была предпринята попытка поиска особенностей состава супракрустальных комплексов различных частей Кейвского домена, подтверждающих или опровергающих на вещественном уровне описанные выше геодинамические построения. В основу этих исследований было положено предположение, что в рамках предложенной модели формирования породных комплексов Кейвской структуры различные ее области должны были бы в разной степени походить по составу на вещество окружающих ее доменов. Так, ее северная часть должна была бы иметь более существенное сходство с породами Мурманского домена, чем южная. Южная же, напротив, должна была бы иметь черты большего сходства с породными ассоциациями Терского домена и Беломорского подвижного пояса, чем северная ее часть. Аналогичным образом должно было бы проявиться, соответственно, сходство пород западной и восточной частей Кейвского и Кольско-Норвежского доменов. Итоги сопоставления полученных в результате математического моделирования данных подтверждают предложенную выше геолого-геофизическую модель развития Кейвской структуры в раннем докембрии [Sorokhtin et al., 2020].

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– эволюция состава метавулканитов в ходе геологического времени накладывает ограничения на применение принципа актуализма для различного рода реконструкций при исследовании древнейших комплексов. С учетом этого более корректным при реконструкции геодинамических обстановок раннего докембрия представляется использование не данных о близости к тому или иному режиму фанерозоя, а тенденций изменения величины сходства-различия с теми или иными из них;

– с использованием предложенных нами методик установлено, что при формировании древнейших породных ассоциаций Кольского региона происходила смена геодинамических режимов, наиболее сходных с траппами, обстановками, более близкими к островодужным. Данные о составе пород Кейвского домена в сравнении с породами его обрамления подтверждают его формирование как древнейшего срединного массива. Установлено, что процессы формирования Кольского орогена имели выраженную пространственно-временную зональность и импульсный характер.

Таким образом, при всех имеющихся ограничениях петрогеохимические методы дают хорошие результаты при изучении истории развития докембрийских комплексов.

*Авторы отдадут дань памяти своему постоянному соавтору Е. В. Мартынову, отвечавшему за математическое обеспечение изложенных выше методов.*

## Литература

Добрецов Н. Л., Верниковский В. А., Карякин Ю. В., Кораго Е. А., Симонов В. А. Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции Центральной и Восточной Арктики // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 8. С. 1126–1144.

Козлов Н. Е. Вещественный состав метаморфических комплексов высокобарных гранулитовых поясов и проблема формирования их протолитов (на примере Лапландских гранулитов): Автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. СПб., 1995. 36 с.

Козлов Н. Е., Мартынов Е. В., Иванов А. А. Черты петрогеохимических различий основных пород энсиалических и энсиматических комплексов (сравнительный анализ фанерозоя и докембрия) // Геохимия. 1999. № 6. С. 582–588.

Козлов Н. Е., Мартынов Е. В., Сорохтин Н. О., Марчук Т. С. Эволюция вещественного состава ме-

табазитов раннего докембрия Кольского региона // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 304–313.

Козлов Н. Е., Мартынов Е. В., Сорохтин Н. О., Марчук Т. С. Петрогеохимические методы реконструкции геодинамических обстановок формирования раннедокембрийских комплексов и их ограничения // Геодинамика раннего докембрия: сходство и различия с фанерозоем: Мат-лы науч. конф. и путеводитель экскурсий. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 117–120.

Sorokhtin N. O., Kozlov N. E., Glaznev V. N., Martynov E. V. A study in Earth's geological evolution (the Baltic Shield). Wiley, 2020. 588 p.

Kozlov N. E., Sorokhtin N. O., Martynov E. V. Geodynamic evolution and metallogeny of Archaean structural and compositional complexes in the north-western Russian Arctic // Minerals. 2018. Vol. 8(12). P. 573. doi: 10.3390/min8120573

## References

Dobretsov N. L., Vernikovskiy V. A., Simonov V. A., Karyakin Y. V., Korago E. A. Mesozoic-Cenozoic volcanism and geodynamic events in the Central and Eastern Arctic. *Russ. Geol. Geophys.* 2013;54(8):874–887.

Kozlov N. E. Material composition of metamorphic complexes of high-pressure granulite belts and the problem of their protoliths formation (on the example of Lapland granulites): Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg; 1995. 36 p. (In Russ.)

Kozlov N. E., Martynov E. V., Ivanov A. A. Features of petrogeochemical differences in basic rocks of ensialic and ensiamatic complexes: Comparative analysis of the Phanerozoic and Precambrian. *Geochem. Intern.* 1999;37(6):512–518.

Kozlov N. E., Martynov E. V., Sorokhtin N. O., Marchuk T. S. Evolution of the material composition of metabasites in the Early Precambrian in the Kola region. *Vestnik MSTU = Vestnik of MSTU.* 2014;17(2):304–313. (In Russ.)

Kozlov N. E., Martynov E. V., Sorokhtin N. O., Marchuk T. S. Petrogeochemical methods of reconstruction of geodynamic formation settings of the Early Precambrian complexes and their constraints. *Geodinamika rannego dokembriya: skhodstvo i razlichiya s fanerozoem: Mat-ly nauch. konf. i putevoditel' ekkursii = Geodynamics in the Early Precambrian: Similar and distinctive features with the Phanerozoic. Proceedings of the sci. conf. and excursion guidebook.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2017. P. 117–120. (In Russ.)

Kozlov N. E., Sorokhtin N. O., Martynov E. V. Geodynamic evolution and metallogeny of Archaean structural and compositional complexes in the north-western Russian Arctic. *Minerals.* 2018;8(12):573. doi: 10.3390/min8120573

Sorokhtin N. O., Kozlov N. E., Glaznev V. N., Martynov E. V. A study in Earth's geological evolution (the Baltic Shield). Wiley; 2020. 588 p.

*Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Козлов Николай Евгеньевич**

д-р геол.-мин. наук, профессор, директор  
ГИ КНЦ РАН

*e-mail: kozlov.n.e@yandex.ru*

### **Сорохтин Николай Олегович**

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник  
лаборатории геодинамики, георесурсов, георисков  
и геоэкологии

*e-mail: nsorokhtin@mail.ru*

## **CONTRIBUTORS:**

### **Kozlov, Nikolay**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Director of the Geological  
Institute KSC RAS

### **Sorokhtin, Nikolay**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Laboratory for  
Geodynamics, Georesources, Georisks, and Geoecology

УДК 552.1, 552.16

## АРХЕЙСКИЕ ЧАРНОКИТ-ЭНДЕРБИТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ БЕЛОМОРЬЯ. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ РАСПЛАВОВ

**В. М. Козловский<sup>1\*</sup>, В. В. Травин<sup>2</sup>, Т. Ф. Зингер<sup>3</sup>,  
Е. Б. Курдюков<sup>1</sup>, М. А. Якушик<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии  
(Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017), \*bazily.koz@gmail.com

<sup>2</sup> Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

<sup>3</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (набережная Макарова, 2,  
Санкт-Петербург, Россия, 199034)

Для наиболее хорошо сохранившегося в Беломорье массива архейских эндербитов и чарнокитов Поньгома-Наволоок установлен протолит и получены условия генерации эндербитового расплава. Выплавление эндербитов главной фазы проходило при  $P = 12,8\text{--}15,8$  кбар и  $T = 1030\text{--}1080$  °С в результате воздействия на амфиболиты мантийного водно-углекислотно-солевого флюида. Архейский гранулитовый метаморфизм в породах Беломорского подвижного пояса обусловлен тепловым потоком, генерированным массивами чарнокитоидов, и имеет контактовую природу.

Ключевые слова: гранулиты; чарнокиты; эндербиты; метаморфический флюид; моделирование условий метаморфизма; Беломорский подвижный пояс

Для цитирования: Козловский В. М., Травин В. В., Зингер Т. Ф., Курдюков Е. Б., Якушик М. А. Архейские чарнокит-эндербитовые комплексы Беломорья. Происхождение и условия генерации расплавов // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 55–59. doi: 10.17076/geo1660

Финансирование. Работы выполнены в рамках базовых тем НИР ИГЕМ РАН, ИГ КарНЦ РАН, ИГГД РАН; анализы минералов для термобарометрических расчетов – в ЦКП «Аналитика» ИГЕМ РАН; ICP MS анализы пород – в ИГ КарНЦ РАН.

**V. M. Kozlovsky<sup>1\*</sup>, V. V. Travin<sup>2</sup>, T. F. Zinger<sup>3</sup>, E. B. Kurdyukov<sup>1</sup>, M. A. Yakushik<sup>1</sup>.  
ARCHEAN CHARNOCKITE–ENDERBITE COMPLEX IN THE WHITE SEA AREA:  
ORIGIN AND MELT GENERATION SETTINGS**

<sup>1</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry,  
Russian Academy of Sciences (35 Staromonetnyi Per., 119017 Moscow, Russia),  
\*bazily.koz@gmail.com

<sup>2</sup> Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

<sup>3</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences  
(2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)

The protolith is reproduced and the parameters of enderbite melt generation are calculated for the Pon'goma Navolok charnockite-enderbite massif (the best preserved massif of the type in the White Sea area). The enderbite melt was derived at  $P = 12.8\text{--}15.8$  kbar and  $T = 1030\text{--}1080$  °C from an amphibolite protolith under the impact of saline  $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{CO}_2$  mantle fluid. The Archean granulite-facies metamorphism of the rocks of the Belomorian Mobile Belt was controlled by heat flux from the charnockite massifs and was thus of contact nature.

Keywords: granulites; charnockites; enderbites; metamorphic fluid; simulation of metamorphism settings; Belomorian Mobile Belt

For citation: Kozlovsky V. M., Travin V. V., Zinger T. F., Kurdyukov E. B., Yakushik M. A. Archean charnockite-enderbite complex in the White Sea area: origin and melt generation settings. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:55–59. doi: 10.17076/geo1660

Funding. The studies were carried out within basic research themes of IGEM RAS, Institute of Geology KarRC RAS, and Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS; analysis of minerals for thermobarometric calculations were performed at the Analytics Core Facility of IGEM RAS; rock ICP MC analysis was performed at the Institute of Geology KarRC RAS.

Большинство первичных особенностей архейских магматических комплексов Беломорского подвижного пояса Северной Карелии плохо сохранились из-за наложенного палеопротерозойского метаморфизма. Однако массив эндербитов и чарнокитов Поньгома-Наволока, открытый Л. А. Косым [1936] и Н. Г. Судовиковым [1937] и изучавшийся К. А. Шуркиным, Г. М. Друговой, О. И. Володичевым, Н. Е. Король и др. [Магматические..., 1980; Король, 2018], представляет собой жесткий блок, сохранившийся между отдельными зонами деформаций, что позволило оценить условия его формирования. Массив имеет двухфазное строение. Главная ранняя фаза внедрения – двупироксеновые эндербиты  $2728 \pm 21$  млн лет [Левченков и др., 1996], поздняя дайковая фаза – пегматоидные или среднезернистые ортопироксеновые чарнокиты предположительно 2718 млн лет.

В теле массива расположены крупные (протяженностью до 800 м и мощностью 30–50 м) пластины (останцы) амфиболитов. Для останцов установлен проградный тренд метаморфических преобразований от амфиболитовой до гранулитовой фации (рис., Б), а в окружающем метаморфическом обрамлении массива следов гранулитового метаморфизма не выявлено. В останцах амфиболитов не выявлено также признаков гранулитовой мигматизации; нет их и в метаморфическом обрамлении. Это является

признаком того, что в современном эрозионном срезе представлена часть интрузивного массива, перемещенного из мест выплавки на более высокие горизонты коры.

Опираясь на многочисленные парные логарифмические соотношения петрогенных и малых элементов в амфиболитах из останцов внутри массива и в эндербитах, можно сказать, что амфиболиты останцов или аналогичные им по химическому составу более глубокие породы являлись протолитом для выплавки эндербитов.

Моделирование плавления амфиболитов и кристаллизации эндербитов проводилось методом псевдосекций с использованием программного комплекса PERPLE\_X 6.8.7. В модели плавления (рис., А) соотношение петрогенных компонентов взято из анализа амфиболита из крупного останца внутри массива. Положение поля устойчивости эндербитового расплава определялось с помощью изоплет молекулярных соотношений  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{CaO})$ ,  $(\text{FeO}+\text{MgO})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{CaO})$ ,  $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{CaO})$ . В модели кристаллизации (рис., Б) соотношение петрогенных компонентов взято из анализа наиболее характерного эндербита. Область кристаллизации оконтурена по изоплетам молекулярных соотношений  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{MgO})$  в ортопироксене и мольной доли An в плагиоклазе.





В результате моделирования определена область, в которой при плавлении амфиболитов под действием  $\text{NaCl-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -флюида наиболее вероятно могло происходить зарождение расплавов, близких по составу к эндербитам массива Поньгома-Наволока:  $P = 12,8\text{--}15,8$  кбар и  $T = 1030\text{--}1080$  °С (среднее значение  $P = 14,8$  кбар и  $T = 1060$  °С для семи анализов эндербитов) (рис., А). Для разных соотношений  $\text{NaCl} : \text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O}$  во флюиде положение области плавления в  $P$ - $T$ -поле отличалось незначительно. Полученные весьма высокие параметры  $P$  и  $T$  указывают на то, что выплавление архейских эндербитов происходило на уровне границы кора-мантия.

Прямоугольниками на рисунке (Б), оконтуренными пунктирной линией, обозначены поля устойчивости минеральных ассоциаций в останце амфиболитов (рассчитаны методом TWQ): I – амфиболиты протолита, II – межзерновые новообразования  $\text{Srx}$  и  $\text{Orx}$ , III – мелкозернистые прожилки  $\text{Srx+Orx+Pl}$ , IV – массивные  $\text{Srx+Orx+Pl}$  гранулиты, V – гигантозернистые  $\text{Srx+Orx+Pl}$  гранулитовые жилы. Пик гранулитового метаморфизма в останцах амфиболитов проходил при существенно более низких температуре и давлении ( $P = 10,2\text{--}11,0$  кбар,  $T = 805\text{--}910$  °С), чем в условиях выплавления эндербитов (рис., А). Это различие совершенно необъяснимо с точки зрения регионального метаморфизма, при котором зарождение эндербитовых и чарнокитовых расплавов происходит в одном  $P$ - $T$ -поле с гранулитами вмещающей рамы. Однако такая ситуация типична для роговиков – пород контактового метаморфизма, которые сформировались под воздействием более горячего интрузивного массива, зародившегося на большей глубине, чем окружающее его обрамление.

Приуроченность многих проявлений основных гранулитов Беломорья к массивам эндербитов и чарнокитов (Поньгома-Наволока, Вичаны, Тупая Губа и др.) свидетельствует в пользу того, что архейский гранулитовый метаморфизм в породах Беломорского подвижного пояса обусловлен тепловым воздействием интрузивных массивов, то есть имеет контакто-метаморфическую природу.

## Литература

Король Н. Е. Метаморфическая эволюция Поньгомнаволоцкого гранулит-эндербит-чарнокитового комплекса Беломорского подвижного пояса // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 11. С. 34–56. doi: 10.17076/geo617

Косой Л. А. Архейские известняки и генезис Беломорской толщи Карелии // Ученые записки ЛГУ. Сер. геолого-почвенно-географическая. Вып. 3. Земная кора. Т. 2. 1936. № 10. С. 53–79.

Левченков О. А., Зингер Т. Ф., Дук В. Л., Яковлева С. З., Байкова В. С., Шулешко И. К., Матуков Д. И. U-Pb-возраст цирконов гиперстеновых диоритов и гранодиоритов о. Поньгом-Наволока (Балтийский щит, Беломорская тектоническая зона) // ДАН. 1996. Т. 349, № 1. С. 90–92.

Магматические формации раннего докембрия территории СССР. Кн. 1. Магматизм древнейшего докембрия / Ред. К. А. Шуркин, В. М. Шемякин. М.: Недра, 1980. 285 с.

Судовиков Н. Г. Геологический очерк Куземско-Поньгомского района // Международный геологический конгресс. XVII сессия. СССР. Северная экскурсия. Карельская АССР / Под ред. А. А. Полканова. Л., 1937. С. 105–117.

## References

Korol' N. E. Metamorphic evolution of the Pongomnavolok granulite-enderbite-charnockite complex, Belomorian Mobile Belt. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2018;11:34–56. doi: 10.17076/geo617 (In Russ.)

Kosoi L. A. Archean limestones and genesis of the Belomorian formation of Karelia. *Proceedings of Leningrad State University. Ser. Geology. Soil Science. Geography*. Iss. 3. The Earth's crust. 1936;2(10):53–79. (In Russ.)

Levchenkov O. A., Zinger T. F., Duk V. L., Yakovleva S. Z., Baikova V. S., Shuleshko I. K., Matukov D. I. U-Pb-age of zircons of hyperstene diorites and granodiorites of Pongom-Navolok Island (Baltic Shield, Belomorian tectonic zone). *Doklady Earth Sciences*. 1996;349(1):90–92. (In Russ.)

Shurkin K. A., Shemyakin V. M. (eds.). Igneous formations of the Early Precambrian on the territory of the USSR. Book 1. Magmatism of the oldest Precambrian. Moscow: Nedra; 1980. 285 p. (In Russ.)

Sudovikov N. G. Geological sketch of the Kuzema-Pongoma region. *International Geological Congress. XVII session. USSR. Northern excursion. Karelian Autonomous Soviet Socialist Republic*. Leningrad; 1937. P. 105–117. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Козловский Василий Михайлович**

д-р геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории метаморфизма и метасоматизма  
им. Д. С. Коржинского

*e-mail: bazily.koz@gmail.com*

### **Травин Вениамин Вениаминович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник музея  
геологии докембрия

*e-mail: vetr@list.ru*

### **Зингер Татьяна Филипповна**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории геологии и геодинамики

*e-mail: tzingerg@mail.ru*

### **Курдюков Евгений Борисович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории метаморфизма и метасоматизма  
им. Д. С. Коржинского

*e-mail: e-kurdyukov@yandex.ru*

### **Якушик Михаил Алексеевич**

младший научный сотрудник лаборатории метаморфизма  
и метасоматизма им. Д. С. Коржинского

*e-mail: yakush.mihail@yandex.ru*

## CONTRIBUTORS:

### **Kozlovsky, Vasily**

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

### **Travin, Veniamin**

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

### **Zinger, Tatyana**

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

### **Kurdyukov, Evgeny**

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

### **Yakushik, Mikhail**

Junior Researcher

УДК 552:550.4

## ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ДИОРИТ-ГРАНОДИОРИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ КУРСКОГО БЛОКА САРМАТИИ: РАСШИФРОВКА СБЛИЖЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Е. Х. Кориш<sup>1\*</sup>, К. А. Савко<sup>1</sup>, Е. Б. Сальникова<sup>2</sup>, А. В. Самсонов<sup>3</sup>,  
А. А. Иванова<sup>2</sup>, А. Н. Ларионов<sup>4</sup>, С. В. Цыбуляев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет (Университетская пл. 1, Воронеж, Россия, 394018), \*korish\_k@rambler.ru

<sup>2</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034)

<sup>3</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017)

<sup>4</sup> Центр изотопных исследований Всероссийского геологического института им. Д. П. Карпинского (Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106)

В Курском блоке Сарматии в период 2,1–2,04 млрд лет происходила активная перестройка континентальной литосферы: 1) субдукция с отрывом слэба (2,14–2,10 млрд лет); 2) коллизия «вулканическая дуга – континент» ( $\approx$  2,09 млрд лет); 3) постколлизийное растяжение и надсубдукционный магматизм (2,08–2,07 млрд лет); 4) коллизия «континент – континент» ( $\approx$  2,07 млрд лет); 5) постколлизийный магматизм (2,07–2,04 млрд лет). Значения возраста от 2,08 до 2,05 млрд лет, полученные методом SIMS по циркону для гранодиоритового магматизма, коррелировались с событиями постколлизийного растяжения. Однако датирование циркона и титани-та из этих пород методом TIMS показало, что их внедрение было 2,08–2,07 млрд лет назад, т. е. до коллизии Сарматии и Волго-Уралии в надсубдукционной обстановке.

Ключевые слова: Сарматия; Курский блок; палеопротерозой; магматизм

Для цитирования: Кориш Е. Х., Савко К. А., Сальникова Е. Б., Самсонов А. В., Иванова А. А., Ларионов А. Н., Цыбуляев С. В. Палеопротерозойский диорит-гранодиоритовый магматизм Курского блока Сарматии: расшифровка сближенных во времени геологических событий // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 60–63. doi: 10.17076/geo1655

**E. Kh. Korish<sup>1\*</sup>, K. A. Savko<sup>1</sup>, E. B. Sal'nikova<sup>2</sup>, A. V. Samsonov<sup>3</sup>, A. A. Ivanova<sup>2</sup>,  
A. N. Larionov<sup>4</sup>, S. V. Tsybulyaev<sup>1</sup>. PALEOPROTEROZOIC DIORITE-GRANODIORITE  
MAGMATISM OF THE KURSK BLOCK OF SARMATIA: DECIPHERING TIME-ADJACENT  
GEOLOGICAL EVENTS**

<sup>1</sup> Voronezh State University (1 Universitetskaya Sq., 394018 Voronezh, Russia), \*korish\_k@rambler.ru

<sup>2</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences  
(2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)

<sup>3</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry (IGEM),  
Russian Academy of Sciences (35 Staromonetnyi Per., 109017 Moscow, Russia)

<sup>4</sup> Centre for Isotope Research, Karpinsky Russian Geological Research Institute (74 Sredniy Ave.,  
199016 St. Petersburg, Russia)

Active reworking of the continental lithosphere took place in the Kursk block of Sarmatia in the interval of 2.1–2.04 Ga: (1) subduction with slab break-off (2.14–2.10 Ga), (2) volcanic arc–continent collision ( $\approx$  2.09 Ga), (3) post-collision extension and supra-subduction magmatism (2.08–2.07 Ga), (4) continent–continent collision ( $\approx$  2.07 Ga), (5) post-collision magmatism (2.07–2.04 Ga). The SIMS zircon ages of 2.08 to 2.05 Ga for granodiorite magmatism indicated a postcollision extension. Zircon and titanite TIMS dating showed that their intrusion occurred at 2.08–2.07 Ga before the collision of Sarmatia and Volgouralia in suprasubduction settings.

Keywords: Sarmatia; Kursk block; Paleoproterozoic; magmatism

For citation: Korish E. Kh., Savko K. A., Sal'nikova E. B., Samsonov A. V., Ivanova A. A., Larionov A. N., Tsybulyaev S. V. Paleoproterozoic diorite-granodiorite magmatism of the Kursk block of Sarmatia: deciphering time-adjacent geological events. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:60–63. doi: 10.17076/geo1655

В палеопротерозойской истории Курского блока был протяженный по времени платформенный этап, когда на архейской платформе в период 2,5–2,4 млрд лет накапливались осадочные формации в условиях пассивной континентальной окраины. На рубеже 2,14–2,10 млрд лет доминировали субдукционные процессы погружения океанической плиты Волго-Донского орогена под континентальную кору Курского блока. С ними связан базальтовый магматизм с возрастом 2,1 млрд лет, вызванный подъемом астеносферных расплавов в зоне деструкции субдуцированной океанической плиты (slab-window) [Цыбуляев и др., 2021]. Причиной отрыва слэба стало аккреционно-коллизийное взаимодействие типа «вулканическая дуга – континент» на окраине Курского блока и Волго-Донского орогена на рубеже около 2,1 млрд лет. После 2,1 млрд лет имел место короткий постколлизийный период релаксации  $\approx$  2,08–2,07 млрд лет. Около 2,07 млрд лет в результате масштабной коллизии «континент-континент» Волго-Уралии и Сарматии в обстановке сжатия осадочные толщи и базальты деформировались и подверглись метаморфизму [Savko et al., 2018]. Распад коллизийного орогена в период 2,07–2,04 млрд лет сопровождался плавлением нижней коры при внедрении базитовых магм в обстановке постколлизийного коллапса и деляминации литосферы [Савко и др., 2014]. Таким образом, в относительно короткий интервал времени 2,1–2,04 млрд лет происходила активная перестройка континенталь-

ной литосферы со сменой геотектонических режимов.

Изотопное датирование магматических событий этого периода выполнялось по циркону на ионном зонде SHRIMP II, точность которого обычно  $\pm$  10–15 млн лет. Поэтому значения возраста от 2,08 до 2,05 млрд лет не могут быть четким признаком геодинамической обстановки. В результате все проявления магматизма этого возраста интерпретировались как постколлизийные, хотя иногда таким выводам противоречили геохимические данные. Примером является диорит-гранодиоритовый магматизм Курского блока. Интрузии гранитоидов образуют массивы и штокообразные тела площадью от 2,5 до 57 км<sup>2</sup> и многочисленные дайки. Методом SIMS были установлены возрасты формирования массивов [Савко и др., 2014, 2021; Кориш и др., 2020]: Роговский – 2045  $\pm$  15 млн лет, Екатериновский – 2049  $\pm$  7 млн лет, Щигровский – 2047  $\pm$  10 млн лет, Северо-Щигровский – 2059  $\pm$  10 млн лет, Луневский – 2038  $\pm$  7 млн лет, Троснянский – 2060  $\pm$  8 млн лет, Прилепский – 2077  $\pm$  8 млн лет для гранодиоритов и 2066  $\pm$  12 млн лет для монзонитов. Так как почти все значения возраста – моложе 2,07 млн лет, считалось, что диорит-гранодиоритовый магматизм имел постколлизийную природу.

Гранодиориты I-типа по геохимии близки к магмам вулканических дуг, а несколько интрузий имеют адакитовые геохимические характеристики, которые не согласуются с обстановкой постколлизийного растяжения и андерплейтинга. Для решения этой проблемы и

более точной возрастной привязки выполнено датирование циркона и титанита из Северо-Щигровской и Прилепской интрузий методом TIMS. Для монцонитов Прилепской интрузии возраст циркона оказался  $2081,2 \pm 3,2$  млн лет (СКВО = 1,18), сфена –  $2086 \pm 12$  млн лет (СКВО = 0,70). Циркон из гранодиоритов Северо-Щигровского массива, датированный методом TIMS, имеет возраст  $2076,1 \pm 2,4$  млн лет (СКВО = 0,64). Таким образом, возраст гранодиоритов оказался древнее коллизионного события 2070 млн лет, что полностью меняет представление о геотектонической позиции диорит-гранодиоритового магматизма.

Оценка возраста формирования Северо-Щигровского и Прилепского массивов 2,07–2,08 млрд лет предполагает, что их внедрение произошло до коллизии Сарматии и Волго-Уралии. После субдукции с отрывом слэба ( $\approx 2,14$ – $2,10$  млрд лет) и коллизией «континент – вулканическая дуга» ( $\approx 2,10$ – $2,09$  млрд лет) был короткий период релаксации и растяжения ( $\approx 2,08$ – $2,07$  млрд лет), когда имел место диорит-гранодиоритовый магматизм. Источником могли быть протолиты из субконтинентальной литосферной мантии при плавлении субдуцированного океанического слэба около 2,1 млрд лет. Существенный вклад архейского корового субстрата (палео- и мезоархейские ТТГ) в петрогенезис диорит-гранодиоритовых магм также не вызывает сомнений. Их внедрение в интервале 2,08–2,07 млрд лет является продуктом магматизма в надсубдукционной обстановке.

## Литература

Кориш Е. Х., Савко К. А., Самсонов А. В., Червяковская М. В. Палеопротерозойские диориты Троснянского массива Курского блока Сарматии: U-Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов // Вестник ВГУ, геол. 2020. № 1. С. 87–99. doi: 10.17308/geology.2020.1/2517

Савко К. А., Самсонов А. В., Базиков Н. С., Козлова Е. Н. Палеопротерозойские гранитоиды Тим-Ястребовской структуры Воронежского кристаллического массива: геохимия, геохронология и источники расплавов // Вестник ВГУ, геол. 2014. № 2. С. 56–78.

Савко К. А., Кориш Е. Х., Базиков Н. С., Цыбуляев С. В., Червяковский В. С., Холина Н. В., Хуссейн И. Палеопротерозойские гранодиориты I-типа Луневского массива в Курском блоке Сарматии: U-Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов // Вестник ВГУ, геол. 2021. № 4. С. 4–23. doi: 10.17308/geology.2021.4/3787

Цыбуляев С. В., Савко К. А., Самсонов А. В., Кориш Е. Х. Палеопротерозойские рифтогенные вулканы OIB- и MORB-типа Курского блока восточной Сарматии: петрология и геодинамика // Петрология. 2021. № 2. С. 136–171. doi: 10.31857/S0869590321020060

Savko K. A., Samsonov A. V., Kotov A. B., Sal'nikova E. B., Korish E. H., Larionov A. N., Anisimova I. V., Bazikov N. S. The early Precambrian metamorphic events in Eastern Sarmatia // Precambrian Res. 2018. Vol. 311. P. 1–23. doi: 10.1016/j.precamres.2018.04.009

## References

Korish E. Kh., Savko K. A., Samsonov A. V., Chervyakovskaya M. V. Paleoproterozoic diorites of the Trosnyansky Massif within the Kursk Block of Sarmatia: U-Pb age, isotope systematic and sources of metls. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2020;1:87–99. doi: 10.17308/geology.2020.1/2517 (In Russ.)

Savko K. A., Korish E. Kh., Bazikov N. S., Tsybulyaev S. V., Chervyakovskiy V. S., Kholina N. V., Hussain I. Palaeoproterozoic I-type granodiorites of the Lunevsky Massif, Kursk Block, Sarmatia: U-Pb age, isotopic systematics and sources of met. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2021;4:4–23. doi: 10.17308/geology.2021.1/3787 (In Russ.)

Savko K. A., Samsonov A. V., Bazikov N. S., Kozlova E. N. Palaeoproterozoic granitoids of the Tim-Yastrebovskaya structure, Voronezh Crystalline Massif: Geochemistry, geochronology, and melt sources. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2014;2:56–78. (In Russ.)

Savko K. A., Samsonov A. V., Kotov A. B., Sal'nikova E. B., Korish E. H., Larionov A. N., Anisimova I. V., Bazikov N. S. The early Precambrian metamorphic events in Eastern Sarmatia. *Precambrian Res*. 2018;311:1–23. doi: 10.1016/j.precamres.2018.04.009

Tsybulyaev S. V., Savko K. A., Samsonov A. V., Korish E. Kh. Paleoproterozoic OIB- and MORB-Type rift volcanics of the Kursk Block, Eastern Sarmatia: Petrology and geodynamics. *Petrology*. 2021;29(2):114–147. doi: 10.1134/S0869591121020065

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кориш Екатерина Хафисовна  
ведущий инженер лаборатории комплексных исследований

e-mail: korish\_k@rambler.ru

## CONTRIBUTORS:

Korish, Ekaterina  
Leading Engineer

**Савко Константин Аркадьевич**

д-р геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой  
полезных ископаемых и недропользования

*e-mail: ksavko@geol.vsu.ru*

**Сальникова Екатерина Борисовна**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории изотопной геологии

*e-mail: esalnikova@peterlink.ru*

**Самсонов Александр Владимирович**

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

*e-mail: samsonov@igem.ru*

**Иванова Анна Александровна**

младший научный сотрудник лаборатории изотопной  
геологии

*e-mail: anna\_al\_ivanova@mail.ru*

**Ларионов Александр Николаевич**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: alexander\_larionov@vsegei.sp.ru*

**Цыбуляев Сергей Владимирович**

преподаватель кафедры полезных ископаемых  
и недропользования

*e-mail: stsybulyaev@bk.ru*

**Savko, Konstantin**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Head of Department

**Sal'nikova, Ekaterina**

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

**Samsonov, Alexander**

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

**Ivanova, Anna**

Junior Researcher

**Larionov, Alexander**

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

**Tsybulyaev, Sergey**

Lecturer

УДК 553.2

## ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГРАНУЛИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ СЕВЕРА АЛДАНО-СТАНОВОГО ЩИТА

**А. А. Кравченко<sup>1\*</sup>, Г. С. Анисимова<sup>1</sup>, В. И. Березкин<sup>1</sup>,  
Н. В. Попов<sup>2</sup>, Е. Е. Лоскутов<sup>1</sup>, А. И. Журавлев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН  
(пр. Ленина, 39, Якутск, Россия, 677980), \*kravchenkoa@diamond.ysn.ru

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского  
отделения РАН (пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090)

Проблемы металлогенической специализации раннедокембрийской континентальной земной коры в различных по составу и обстановкам формирования метаморфических комплексах имеют актуальное значение для развития региональной металлогении. В работе рассмотрены геологическое строение, особенности минерального и вещественного состава месторождений и пунктов минерализации в палеопротерозойских гранулитовых комплексах Алдано-Станового щита. Выполнено сопоставление особенностей состава с рудными месторождениями в свекофеннидах Балтийского щита как хорошо изученной складчатой области. Сделан вывод о сходстве металлогенической специализации метаморфических комплексов.

Ключевые слова: Алдано-Становой щит; палеопротерозой; рудная минерализация.

Для цитирования: Кравченко А. А., Анисимова Г. С., Березкин В. И., Попов Н. В., Лоскутов Е. Е., Журавлев А. И. Геология и металлогеническая специализация палеопротерозойских гранулитовых комплексов севера Алдано-Станового щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 64–67. doi: 10.17076/geo1697

Финансирование. Исследования выполнены в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН и договорных работ с АО «Золото Селигдара».

**A. A. Kravchenko<sup>1\*</sup>, G. S. Anisimova<sup>1</sup>, V. I. Beryozkin<sup>1</sup>, N. V. Popov<sup>2</sup>,  
E. E. Loskutov<sup>1</sup>, A. I. Zhuravlev<sup>1</sup>. GEOLOGY AND METALLOGENIC  
SPECIALIZATION OF PALEOPROTEROZOIC GRANULITE COMPLEXES  
IN THE NORTH OF THE ALDAN-STANOVY SHIELD**

<sup>1</sup> Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy  
of Sciences (39 Lenin Ave., 677980 Yakutsk, Russia), \*kravchenkoa@diamond.ysn.ru

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy  
of Sciences (3 Acad. Koptuyug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia)



The problems of metallogenic specialization of the Early Precambrian continental crust in metamorphic complexes of varying composition and formation conditions are of great importance for the development of regional metallogeny. The paper considers the geology, features of the mineral and material composition of deposits and points of mineralization in the Paleoproterozoic granulite complexes of the Aldan-Stanovoy Shield. We compared the features of composition with those of ore deposits in Svecofennides of the Baltic Shield as a well-studied folded region. The conclusion was drawn about similarities in the metallogenic specialization of the metamorphic complexes.

**Keywords:** Aldan-Stanovoy Shield; Paleoproterozoic; ore mineralization

**For citation:** Kravchenko A. A., Anisimova G. S., Beryozkin V. I., Popov N. V., Loskutov E. E., Zhuravlev A. I. Geology and metallogenic specialization of Paleoproterozoic granulite complexes in the north of the Aldan-Stanovoy Shield. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:64–67. doi: 10.17076/geo1697

**Funding.** The studies were carried out under state assignment to the Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS and under contract with Seligdar Gold JSC.

Длительный период становления Алдано-Станового щита (3,5–1,7 млрд лет) сопровождался неоднократными процессами метаморфизма, магматизма и деформации, что обусловило его сложное строение [Котов, 2003]. В настоящее время в тектонической структуре щита выделяется несколько крупных блоков – составных террейнов и супертеррейнов, ограниченных крупными разломами и зонами тектонического меланжа [Смелов и др., 2001а]. Формирование расположенных в северной части щита гранулитогнейсовых Нимнырского и Учурского террейнов и отделяющих их структур связывается предшественниками с субдукцией, коллизией микроплит, микроконтинентов и островных дуг [Mints et al., 2000]. Металлогения щита изучена в значительно меньшей мере, чем Балтийского [Турченко, 2007]. Описаны главным образом месторождения железа, флогопита и апатита [Рундквист и др., 1999; Mints et al., 2000]. Полиметаллическая минерализация упоминалась изредка как сопутствующая [Смелов и др., 2001б]. В последние десятилетия специалистами предприятия «Якутскгеология» открыты новые докембрийские золоторудные объекты. Обнаружение объектов с неизвестными ранее типами минерализации делает актуальным изучение вещественного состава метаморфических комплексов. Нашим коллективом при помощи сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6480LV с энергетическим спектрометром фирмы OXFORD изучены составы рудных минералов в метаморфических комплексах. Рентгено-флуоресцентным анализатором Niton XL3tGOLDD определены содержания элементов-примесей в горных породах. Проведен факторный анализ их содержаний.

В кристаллических сланцах и амфиболитах золоторудных объектов и склоновых отложений

бассейнов золотых россыпей минерализация встречена на участках повторного расщепления и метаморфической полосчатости в пространственной связи с кварцевыми жилами. Обнаружены сульфидно-арсенидные метаморфогенно-гидротермальные руды. Золото сконцентрировано в леллингите, встречается самородное золото и мальдонит. В золотосодержащих породах часто встречаются: арсенопирит, никелин, кобальтин, пирротин и висмут. В нескольких пробах обнаружены серебро и антимонит. Состав руд схож с гипо- и мезозональными орогенными месторождениями [Groves et al., 2020].

В диопсидовых породах магнезиальных скарнов, сопровождающих флогопитовую и магнетитовую минерализацию, обнаружены золото, серебро, шеелит, молибдошеелит, зигенит, халькопирит и сфалерит. В пространственно сопряженных со скарнами кварцевых породах с графитом встречены сфалерит и халькопирит, микровключения металлов: самородной меди с примесями олова и никеля, кобальта с примесью вольфрама, вольфрама, золота и серебра. Содержание некоторых из металлов в скарнах и кварцитах ранее оценивалось предшественниками с целью попутной добычи.

В диафторитах по кристаллическим сланцам основного состава и метадиоритам обнаружены сульфидная и золотая минерализация в ассоциации с зонами катаклаза, эпидотовыми замещениями, прожилками и выделениями хлорита. В диафторитах по кристаллосланцам диагностированы борнит, халькозин, теллуриды и самородное золото с примесями меди, висмута, теллура. В диафторитах по метадиоритам встречаются пирит и халькопирит, флюорит и галенит, золото.

Результаты факторного анализа содержания элементов-примесей по совокупности различных пород показали близкое распределение Au, Ag, As, Sb, W, Mo, Zn, Co, Fe с одной стороны, Cr, Cu, Ni, S, Te, Pd с другой, что в общих чертах отражает профили описанных выше типов минерализации.

В свекофеннидах Балтийского щита [Горячев, 2014] минералами орогенных месторождений золота являются: пирит, пирротин, арсенопирит, халькопирит, леллингит, сфалерит, галенит, кобальтин, пентландит, тетраэдрит, аурустибит, мальдонит, самородные Bi, Sb, Ag, теллуриды Bi, Pb, Fe, Ni, золото, серебро и др. Здесь также описаны скарновые месторождения с магнетитовым и сульфидным полиметаллическим оруденением (Fe-Mn, Fe-Co-Ni, Fe-апатитовые, Cu-Pb-Zn, Au-Bi-Se, W-Mo), кварциты с полиметаллической минерализацией и связанные с эпидот-хлоритовыми замещениями борнитовые руды с золотом [Mineral..., 2012; Кулешевич, Лавров, 2013].

Металлогеническая специализация и рудные минеральные ассоциации палеопротерозойских метаморфических комплексов Алдано-Станового и Балтийского щитов имеют определенные черты сходства, причины чего предстоит изучить.

## Литература

Горячев Н. А. Благороднометалльный рудогенез и мантийно-коровое взаимодействие // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 2. С. 323–332.

Котов А. Б. Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. СПб., 2003. 78 с.

Кулешевич Л. В., Лавров О. Б. Типоморфные особенности золота докембрийских месторождений и проявлений Карелии // Золото Фенноскандинавского щита: Мат-лы междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 109–112.

Рундквист Д. В., Минц М. В., Ларин А. М. и др. Металлогения рядов геодинамических обстановок раннего докембрия / Редкол.: Г. С. Гусев (отв. ред.) и др. М.: МПР РФ, РАН, Геокарт, РосГео, 1999. 398 с.

Смелов А. П., Зедгенизов А. Н., Тимофеев В. Ф. Алдано-Становой щит // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: Наука/Интерпериодика, 2001а. С. 81–103.

Смелов А. П., Никитин В. М., Бирюлькин Г. В., Попов Н. В., Стогний В. В. Каларо-Учурский раннепротерозойский коллизионный металлогенический пояс // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: Наука/Интерпериодика, 2001б. С. 306–316.

Турченко С. И. Металлогения тектонических структур палеопротерозоя. СПб.: Наука, 2007. 175 с.

Groves D. I., Santosh M., Deng J., Wang Q., Yang L., Zhang L. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration // Mineralium Deposita. 2020. Vol. 55. P. 275–292. doi: 10.1007/s00126-019-00877-5

Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia / Eilu P. (ed.). Geological Survey of Finland, Special Paper 53. 2012. 401 p.

Mints M. V., Rundqvist D. V., Larin A. M., Nenaikhov V. M., Rytsk E. Yu., Turchenko S. I., Chernyshov N. M. Early Precambrian geodynamics and metallogeny // Geodynamics and Metallogeny: Theory and Implications for Applied Geology. Moscow, 2000. P. 105–191.

## References

Goryachev N. A. Noble-metal ore genesis and mantle–crust interaction. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*. 2014;55(2):323–332. (In Russ.)

Kotov A. B. Boundary conditions in geodynamic models of the Aldan Shield Crust formation: Summary of DSc (Dr of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg; 2003. 78 p. (In Russ.)

Kuleshevich L. V., Lavrov O. B. Typomorphic features of gold of the Precambrian deposits and manifestations in Karelia. *Zoloto Fennoskandinavskogo shchita: Mat-ly mezhdunar. konf. = Gold of the Fennoscandian Shield: Proceedings intern. conf.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. P. 109–112. (In Russ.)

Rundqvist D. V., Mints M. V., Larin A. M. et al. Metallogeny of the series of geodynamic situations at the Early Precambrian. Moscow: MPR RF, RAN, Geokart, RosGeo; 1999. 398 p. (In Russ.)

Smelov A. P., Zedgenizov A. N., Timofeev V. F. Aldano-Stanovoy Shield. *Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) = Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Moscow: Nauka/Interperiodika; 2001a. P. 81–103. (In Russ.)

Smelov A. P., Nikitin V. M., Biryul'kin G. V., Popov N. V., Stognii V. V. Kalar-Uchur Early Proterozoic collisional metallogenic belt. *Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) = Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Moscow: Nauka/Interperiodika; 2001b. P. 306–316. (In Russ.)

Turchenko S. I. Metallogeny of the Paleoproterozoic tectonic structures. St. Petersburg: Nauka; 2007. 175 p. (In Russ.)

Groves D. I., Santosh M., Deng J., Wang Q., Yang L., Zhang L. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Mineralium Deposita*. 2020;55:275–292. doi: 10.1007/s00126-019-00877-5 (In Russ.)

Eilu P. (ed.). Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia. *Geological Survey of Finland, Special Paper*. 2012;53. 401 p.

Mints M. V., Rundqvist D. V., Larin A. M., Nenaikhov V. M., Rytsk E. Yu., Turchenko S. I., Chernyshov N. M. Early Precambrian geodynamics and metallogeny. *Geodynamics and Metallogeny: Theory and Implications for Applied Geology*. Moscow; 2000. P. 105–191.

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Кравченко Александр Александрович**

канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией металлогении

*e-mail: kravchenkoa@diamond.ysn.ru*

**Анисимова Галина Семеновна**

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и минералогии благородных металлов

*e-mail: g.s.anisimova@diamond.ysn.ru*

**Березкин Василий Ионович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории металлогении

*e-mail: beryozkin2003@list.ru*

**Попов Николай Васильевич**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории палеонтологии и стратиграфии докембрия

*e-mail: PopovNV@ipgg.sbras.ru*

**Лоскутов Евгений Евгеньевич**

канд. геол.-мин. наук, ученый секретарь

*e-mail: loskutov@diamond.ysn.ru*

**Журавлев Анатолий Иванович**

младший научный сотрудник лаборатории «Геологический музей»

*e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com*

#### **CONTRIBUTORS:**

**Kravchenko, Alexander**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Metallogeny Laboratory

**Anisimova, Galina**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory for Precious Metal Geology and Mineralogy

**Beryozkin, Vasiliy**

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

**Popov, Nikolai**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory for Precambrian Paleontology and Stratigraphy

**Loskutov, Evgeny**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Secretary for Science

**Zhuravlev, Anatoly**

Junior Researcher, Geological Museum Laboratory

УДК 553.411 (470.21)

## АРХЕЙСКАЯ ЭПОХА РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО (Li, Cs) ПЕГМАТИТООБРАЗОВАНИЯ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

Н. М. Кудряшов<sup>1\*</sup>, Е. В. Галеева<sup>1</sup>, О. В. Удоратина<sup>2</sup>,  
А. А. Калинин<sup>1</sup>, М. Гроув<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН (ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Россия, 184209),  
\*nik@geoksc.apatity.ru

<sup>2</sup> Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ул. Первомайская, 54, Сыктывкар,  
Республика Коми, Россия, 167982)

<sup>3</sup> Стэнфордский университет (Стэнфорд, Калифорния, США, 94305)

Приведены результаты изотопно-геохронологического изучения циркона из редкометалльных пегматитов месторождения Охмыльк и Васин-Мыльк. До настоящего времени не было достоверных данных о возрасте лепидолит-сподумен-поллуцитовых пегматитов архейского зеленокаменного пояса Колмозеро – Воронья. Предполагаемые оценки указывали на довольно широкий временной диапазон от 2,7 до 1,7 млрд лет. Новые U-Pb (SHRIMP-RG) изотопно-геохронологические данные по циркону из пегматитовых жил месторождения Охмыльк с возрастом  $2607 \pm 9$  и  $2619 \pm 29$  млн лет для месторождения Васин-Мыльк отражают время их кристаллизации. Полученные результаты свидетельствуют о неоархейском времени образования месторождений на рубеже 2,65–2,60 млрд лет, отражая глобальную эпоху архейского редкометалльного пегматитообразования. Изотопные данные с возрастом ~1,9–1,6 млрд лет указывают на более поздние, вероятно, гидротермально-метасоматические преобразования.

Ключевые слова: редкометалльные (Li, Cs) пегматиты; U-Pb изотопный возраст; SHRIMP-RG; циркон; месторождения Охмыльк и Васин-Мыльк; Фенноскандинавский щит

Для цитирования: Кудряшов Н. М., Галеева Е. В., Удоратина О. В., Калинин А. А., Гроув М. Архейская эпоха редкометалльного (Li, Cs) пегматитообразования в северо-восточной части Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 68–72. doi: 10.17076/geo1670

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-27-00589.

**N. M. Kudryashov<sup>1\*</sup>, E. V. Galeeva<sup>1</sup>, O. V. Udoratina<sup>2</sup>, A. A. Kalinin<sup>1</sup>, M. Grove<sup>3</sup>.  
THE ARCHEAN STAGE OF RARE-METAL (Li, Cs) PEGMATITE FORMATION  
IN THE NORTH-EASTERN PART OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD**

<sup>1</sup> Geological Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences (14 Fersmana St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia), \*nik@geoksc.apatity.ru

<sup>2</sup> Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (54 Pervomayskaya St., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia)

<sup>3</sup> Stanford University, Department of Geological Sciences (Stanford, California, USA, 94305)

The results of an isotopic geochronological study of zircons from rare-metal pegmatite deposits Okhmyl'k and Vasin-Myl'k are presented. No reliable data on the age of pollucite-spodumene-lepidolite pegmatite veins in the Kolmozero – Voron'ya Archean greenstone belt were previously available and the age estimations varied in a long time interval from 2.7 to 1.7 Ga. New U-Pb (SHRIMP-RG) data for zircons indicate crystallization of pegmatite at  $2607 \pm 9$  Ma in the Okhmyl'k and at  $2619 \pm 29$  Ma in the Vasin-Myl'k. This age corresponds to the global Archean stage of rare-metal pegmatite formation at 2.65–2.60 Ga. Isotope dates of ~1.9–1.6 Ga indicate the age of later hydrothermal-metasomatic processes in the pegmatite veins.

**Keywords:** rare-metal (Li, Cs) pegmatite; U-Pb isotope age; SHRIMP-RG; zircon; Okhmyl'k and Vasin-Myl'k deposits; Fennoscandian Shield

**For citation:** Kudryashov N. M., Galeeva E. V., Udoratina O. V., Kalinin A. A., Grove M. The Archean stage of rare-metal (Li, Cs) pegmatite formation in the north-eastern part of the Fennoscandian Shield. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:68–72. doi: 10.17076/geo1670

**Funding.** The study was supported by the Russian Science Foundation grant # 22-27-00589.

Один из подходов к систематическому изучению эволюции Земли – это анализ глобальных геологических эпох [Bradley, 2011]. Выявление и обоснование подобных эпох в развитии планеты базируются прежде всего на сборе данных из большого количества опубликованных работ по распределению возрастных определений для пород и минералов. Месторождения редкометалльных пегматитов присутствуют на всех континентах и охватывают примерно 3 млрд лет истории Земли, начиная с мезоархея. Глобальное возрастное распределение эпох редкометалльного пегматитообразования сходно с распределением обычных пегматитов, орогенных гранитов и детритовых цирконов. Пиковые временные импульсы образования пегматитов приходятся на рубежи около 2640, 1800, 960, 485 и 310 млн лет назад и соответствуют периодам коллизионного орогенеза и сборки суперконтинентов. Между этими импульсами были длительные промежутки времени, когда пегматиты формировались в незначительных масштабах или вообще не образовывались [Tkachev, 2011; McCauley, Bradley, 2014]. Среди архейских крупных месторождений семейства LCT (литий-цезий-тантал) можно отметить пегматиты Гринбушес в Западной Австралии (воз-

раст 2527 млн лет), пегматиты Бикита в Зимбабве (~ 2650 млн лет) и пегматиты Танко в Канаде (2640 млн лет).

Крупные месторождения редкометалльных LCT-пегматитов, которые выделяются в северо-восточной части Фенноскандинавского щита, сконцентрированы в зеленокаменном поясе Колмозеро – Воронья. Пояс расположен в зоне глубинного разлома на границе трех крупных блоков – Мурманского, Кольско-Норвежского и Кейвского, сложен преимущественно метаморфизованными осадочно-вулканогенными породами позднеархейского возраста (2,9–2,8 млрд лет). Породы осадочно-вулканогенного комплекса прорываются более поздними (2,73–2,68 млрд лет) высокомагнезиальными интрузиями дифференцированной серии габбро-гранодиорит-гранитного состава (санукитоиды), а также турмалин-мусковитовыми и микроклиновыми гранитами (2,7–2,5 млрд лет). В пределах пояса расположены два крупных поля редкометалльных пегматитов (Li, Cs с попутными Nb, Ta, Be). В северо-западной части располагаются месторождения лития и цезия Охмыльк, Васин-Мыльк, Оленинское и Полмостундра, в юго-восточной части – крупнейшее литиевое месторождение сподуменовых пегматитов Колмозерское. Месторождения

пегматитов, размещенные в северо-западной части, обнажаются среди амфиболитов пояса, Колмозерские сподуменовые пегматиты прорывают интрузивное тело габбро-анортозитов Патчемварекского массива с возрастом 2,93 млрд лет [Кудряшов, Мокрушин, 2011].

Изотопно-геохронологические определения жил различных пегматитов и гранитоидов, выделяемых в пределах пояса, по имеющимся данным, охватывают довольно широкий временной диапазон – 2,7–1,7 млрд лет. В последние годы были получены новые изотопно-геохронологические результаты для гранитоидов, как возможных источников вещества для редкометалльных пегматитов. Возрастные данные для турмалин-мусковитовых гранитов северо-западного поля оцениваются в ~ 2,6–2,5 млрд лет, для юго-восточной части пояса, в районе размещения сподуменовых пегматитов Колмозерского месторождения, определен возраст турмалин-мусковитовых гранитов 2,8–2,7 млрд лет [Kudryashov et al., 2020]. Эти разрозненные данные до настоящего времени не позволяли дать точную оценку возраста каждого из месторождений, поэтому были поставлены задачи изотопно-геохронологического изучения циркона из пегматитовых жил локальным U-Pb (SHRIMP-RG) методом.

**Месторождение Охмыльк.** Пегматитовое поле месторождения занимает площадь около 600 м<sup>2</sup>, прослеживается по простиранию на 1,25 км и характеризуется высокой насыщенностью пегматитовыми жилами. Для геохронологического изучения была взята проба из жилы лепидолит-турмалин-сподуменового состава. Циркон, выделенный из пробы, представлен идиоморфными, изометричными и близкими к изометричным дипирамидальными и дипирамидально-призматическими полупрозрачными трещиноватыми кристаллами, реже ксеноморфными зернами серого, серо-коричневого цвета. Размеры не превышают 1 мм и наиболее часто составляют 0,3–0,5 мм. Индивиды циркона развиты преимущественно с альбитом и кварцем, присутствуют сростания циркона с минералами группы колумбита. Внутреннее строение циркона характеризуется центральными участками в виде пятнистой текстуры с включениями урановых оксидов, во внешних частях некоторых кристаллов отчетливо выделяются узкие участки с признаками поздней перекристаллизации.

Для четырех проанализированных точек циркона из центральных зон получен дискордантный возраст  $2607 \pm 9$  млн лет, СКВО = 0,87 (рис.), который отражает время форми-

рования пегматитов месторождения Охмыльк. Аналитические данные для двух точек из перекристаллизованных зон по  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  составили ~1,7–1,6 млрд лет, что указывает на более поздние, вероятно, метасоматически-гидротермальные процессы.

**Месторождение Васин-Мыльк.** Пегматитовое поле месторождения Васин-Мыльк с продуктивной ассоциацией лепидолит-альбит-микроклин-сподумен-поллуцит расположено среди амфиболитов. Незначительные по размеру участки выходов пегматитов на поверхность прослежены на глубину при прохождении шурфов и скважин. Месторождение представляет собой субпараллельные пологие зональные жилы протяженностью до 220 м при мощности 5 м. Среди разнообразных минералов, часто представленных в пегматитовых жилах несколькими генерациями, к наиболее ранним относятся минералы группы колумбита-танталита, микролит, симпсонит, торолит, циркон [Волошин, Пахомовский, 1988]. Ранее был проанализирован микролит ранней генерации U-Pb (ID TIMS) методом, возраст которого составил  $2454 \pm 8$  млн лет [Кудряшов и др., 2015]. Циркон из пегматитовых жил здесь представлен двумя резко отличающимися по составу генерациями: высокоурановые единичные кристаллы ранней генерации, а также основная масса практически безуранового высокогафниевого циркона поздней генерации. Для циркона поздней генерации, в котором содержание урана составляло всего 0,2–0,3 ppm, не представлялось возможным определение U-Pb-возраста [Kudryashov et al., 2019]. U-Pb-методом были проанализированы несколько кристаллов циркона ранней генерации. Циркон этой генерации представлен идиоморфными, изометричными дипирамидально-призматическими полупрозрачными трещиноватыми кристаллами темно-коричневого и серого цвета. Внутреннее строение циркона характеризуется фазовой неоднородностью, где выделяются центральные и краевые зоны. Центральные зоны обогащены ураном, PЗЭ и иттрием,  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 0,01–0,02$ . Краевые участки содержат значительно меньшие концентрации урана, иттрия и PЗЭ,  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 0,3–0,8$ .

Для четырех проанализированных точек циркона из центральных зон получен близконкордантный возраст  $2619 \pm 29$  млн лет, СКВО = 2,2 (рис.), который отражает время формирования пегматитов месторождения Васин-Мыльк. Аналитические данные трех точек из краевых зон по отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  составили 1,9–1,6 млрд лет, что указывает на более поздние события.

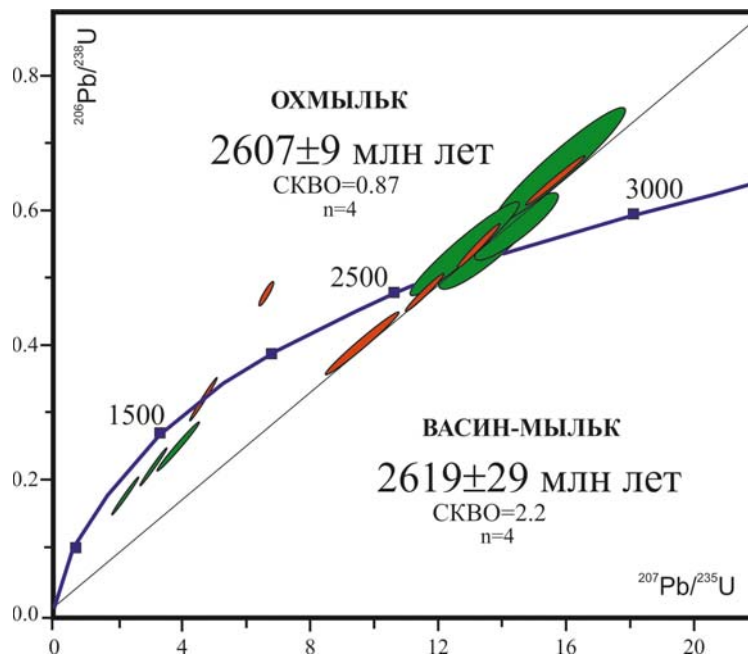


Диаграмма с конкордией для циркона из месторождений Охмыльк (красные эллипсы) и Васин-Мыльк (зеленые эллипсы)  
 Concordia diagram for the magmatic zircon from the Okhmil'k (green ellipses), Vasin-Mylk (red ellipses) deposits

Полученные изотопные возрасты магматического циркона  $2607 \pm 9$  млн лет для месторождения Охмыльк и  $2619 \pm 29$  млн лет для месторождения Васин-Мыльк служат надежной оценкой времени их кристаллизации, отражая глобальную эпоху пегматитообразования, с которой связаны формирования крупнейших мировых редкометалльных месторождений на рубеже 2,60–2,65 млрд лет. Образование внешних каем связано с полной перекристаллизацией циркона в палеопротерозойское время на рубеже 1,9–1,6 млрд лет назад. Анализ литературных данных показывает, что основные геолого-минералогические и геохимические характеристики ЛСТ-пегматитов со временем практически не изменялись. Тем не менее отмечается, что архейские ЛСТ-пегматиты образовались из метаглиноземистых исходных расплавов, в отличие от более молодых пегматитов, связанных с перглиноземистыми расплавами [Martin, De Vito, 2005]. Этот вывод подтверждается и изучением древнейшего (хаддейского) обломочного циркона Джек-Хиллз [Trail et al., 2017].

## Литература

Волошин А. В., Пахомовский Я. А. Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах. Л.: Наука, 1988. 240 с.

Кудряшов Н. М., Мокрушин А. В. Мезоархейский габбро-анортозитовый магматизм Кольского региона: петрохимические, геохронологические и изотопно-геохимические данные // Петрология. 2011. Т. 19, № 2. С. 173–189.

Кудряшов Н. М., Лялина Л. М., Апанасевич Е. А. Возраст редкометалльных пегматитов месторождения Васин-Мыльк (Кольский регион): результаты геохронологического U-Pb-исследования микролита // ДАН. 2015. Т. 461, № 4. С. 437–441.

Bradley D. C. Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle // Earth-Science Reviews. 2011. Vol. 108, iss. 1-2. P. 16–33. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.05.003

Kudryashov N. M., Udoratina O. V., Coble M., Steshenko E. N. Geochronological and geochemical study of zircon from tourmaline-muscovite granites of the Archaean Kolmozero-Voronya Greenstone Belt: Insights into sources of the rare-metal pegmatites // Minerals. 2020. Vol. 10(9). Art. 760. doi: 10.3390/min10090760

Kudryashov N. M., Skublov S. G., Galankina O. L., Udoratina O. V., Voloshin A. V. Abnormally high-hafnium zircon from rare-metal pegmatites of the Vasin-Mylk deposit (the northeastern part of the Kola Peninsula) // Geochemistry. 2019. Vol. 80, no. 3. doi: 10.1016/j.geoch.2018.12.001

Martin R. F., De Vito C. The patterns of enrichment in felsic pegmatites ultimately depend on tectonic setting // Can. Mineral. 2005. Vol. 43. P. 2027–2048.

McCauley A., Bradley D. C. The global age distribution of granitic pegmatites // Can. Mineral. 2014. Vol. 52. P. 183–190. doi: 10.3749/canmin.52.2.183

Tkachev A. V. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time. Geological Society, London, Special Publications. 2011. Vol. 350. P. 7–23. doi: 10.1144/SP350.2

Trail D., Tailby N., Wang Y., Harrison T. M., Boehnke P. Aluminum in zircon as evidence for peraluminous and metaluminous melts from the Hadean to present // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2017. Vol. 18, iss. 4. P. 1580–1593. doi: 10.1002/2016GC006794

## References

Bradley D. C. Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle. *Earth-Science Reviews*. 2011;108(1-2):16–33. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.05.003

Kudryashov N. M., Mokrushin A. V. Mesoarchean gabbroanorthosite magmatism of the Kola Region: Petrochemical, geochronological, and isotope-geochemical data. *Petrology*. 2011;19:167–182. doi: 10.1134/S086959111102007X

Kudryashov N. M., Lyalina L. M., Apanasevich E. A. Age of rare metal pegmatites from the Vasin-Mylk deposit (Kola Region): Evidence from U–Pb geochronology of microlite. *Doklady Earth Sciences*. 2015;461(2):321–325. doi: 10.1134/S1028334X15040042

Kudryashov N. M., Udoratina O. V., Coble M., Steshenko E. N. Geochronological and geochemical

study of zircon from tourmaline-muscovite granites of the Archaean Kolmozero–Voronya Greenstone Belt: Insights into sources of the rare-metal pegmatites. *Minerals*. 2020;10(9):760. doi: 10.3390/min10090760

Kudryashov N. M., Skublov S. G., Galankina O. L., Udoratina O. V., Voloshin A. V. Abnormally high-hafnium zircon from rare-metal pegmatites of the Vasin-Mylk deposit (the northeastern part of the Kola Peninsula). *Geochemistry*. 2019;80(3):125489. doi: 10.1016/j.geoch.2018.12.001

Martin R. F., De Vito C. The patterns of enrichment in felsic pegmatites ultimately depend on tectonic setting. *Can. Mineral*. 2005;43:2027–2048.

McCauley A., Bradley D. C. The global age distribution of granitic pegmatites. *Can. Mineral*. 2014;52:183–190. doi: 10.3749/canmin.52.2.183

Tkachev A. V. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time. Geological Society, London, Special Publications. 2011;350:7–23. doi: 10.1144/SP350.2

Trail D., Tailby N., Wang Y., Harrison T. M., Boehnke P. Aluminum in zircon as evidence for peraluminous and metaluminous melts from the Hadean to present. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2017;18(4):1580–1593. doi: 10.1002/2016GC006794

Voloshin A. V., Pakhomovsky Ya. A. Ta and Nb mineralogy in rare-metal pegmatites. Leningrad: Nauka; 1988. 240 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Кудряшов Николай Михайлович

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: nik@geoksc.apatity.ru

### Галеева Елена Викторовна

аспирант

e-mail: uthg@mail.ru

### Удоратина Оксана Владимировна

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: udoratina@geo.komisc.ru

### Калинин Аркадий Авенирович

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru

### Гроув Мартин

профессор геологических наук

e-mail: coblem@stanford.edu

## CONTRIBUTORS:

### Kudryashov, Nikolai

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

### Galeeva, Elena

Graduate Student

### Udoratina, Oksana

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

### Kalinin, Arkady

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

### Grove, Martin

Professor of Geological Sciences



УДК 551.72; 551.24.056

## АНОРОГЕННЫЙ МАГМАТИЗМ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА КАК СВИДЕТЕЛЬСТВО ПРОЦЕССОВ РАСПАДА СУПЕРКОНТИНЕНТОВ

**И. И. Лиханов**

*Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3,  
Новосибирск, Россия, 630090)*

Рассмотрены геологические, геохимические и изотопно-геохронологические свидетельства мезо- и неопротерозойских событий на западной окраине Сибирского кратона. Время внедрения анорогенных гранитов А-типа представлено двумя пиками – 1380–1360 и 800–720 млн лет. Эти события сопоставляются с этапами распада докембрийских суперконтинентов Нуна и Родиния и подтверждают территориальную близость Сибири и кратонов Северной Атлантики (Лаврентии и Балтики) в широком диапазоне времени (1,38–0,72 млрд лет).

Ключевые слова: А-граниты; геохимия; внутриплитная тектоника; геохронология; суперконтиненты

Для цитирования: Лиханов И. И. Анорогенный магматизм Енисейского кряжа как свидетельство процессов распада суперконтинентов // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 73–76. doi: 10.17076/geo1681

Финансирование. Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ (проект № 21-77-20018).

### **I. I. Likhanov. ANOROGENIC MAGMATISM OF THE YENISEY RIDGE: EVIDENCE FOR BREAKUP OF SUPERCONTINENTS**

*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences  
(3 Acad. Koptug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia)*

The paper reports the occurrence of A-type granites with geochemical features indicating intraplate settings for the Yenisey Ridge. Zircon U–Pb analyses coupled with in situ U–Th–Pb geochronology of monazite constrain the timing of emplacement of the rift-related granitoids and suggest two breakup events at 1380 Ma and 800–720 Ma. These episodes of regional crustal evolution correlate with the breakup ages of the Precambrian supercontinents Nuna and Rodinia and support the spatial proximity of Siberia and North Atlantic cratons (Laurentia and Baltica) over a long period of 1.38–0.72 Ga.

Keywords: A-type granites; geochemistry; intraplate tectonics; geochronology; supercontinents

Тектоническое строение и эволюция Центрального блока (ЦБ), слагающего большую часть Енисейского кряжа, дискуссионны. ЦБ рассматривают как: 1) экзотический террейн, причленившийся к Сибирскому кратону (СК) ~ 760 млн лет назад, 2) выход архей-палеопротерозойского фундамента СК, переработанного в ходе последующих тектоно-термальных событий, или 3) коллизионно-аккреционную структуру, на западе СК, консолидированную в течение мезо-неопротерозойской эволюции [Likhanov et al., 2004, 2018; Лиханов и др., 2014]. С другой стороны, 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 суперконтинентов Нуны и Родинии.

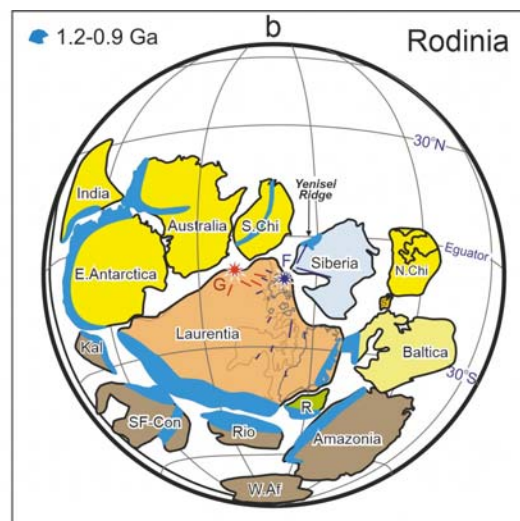
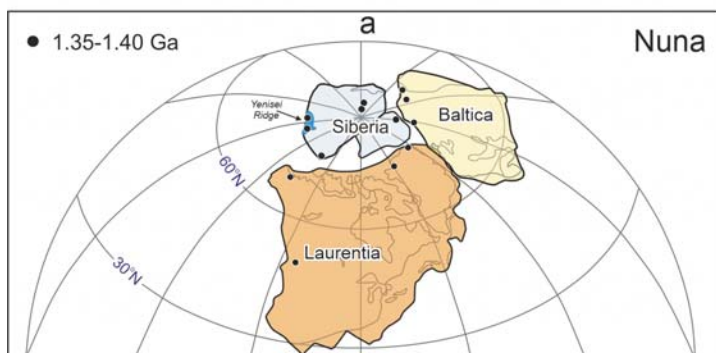
В этой связи нами рассмотрены геологические, геохимические и изотопно-геохронологические свидетельства мезо- и неопротерозойских событий на западной окраине Сибирского кратона и показано многократное проявление внутриплитного магматизма в обстановках литосферного растяжения, связанных с проявлением плюмовой активности. Объекты исследования, представленные субщелочными гранитоидами, расположены на северо-западе Заангарья Енисейского кряжа в пределах тейского и гаревского комплексов, приуроченных к линейным зонам смятия вдоль Татарско-Ишимбинской (ТИСЗ) и Приенисейской (ПРСЗ) систем разломов.

Рифтогенная природа изученных гранитоидов Заангарья Енисейского кряжа обосновывается их морфологией в виде даек и силлов и/или тектонических пластин и клиньев, приуроченных к зонам региональных разломов, бимодальным составом продуктов магматизма и свойственными для внутриплитных гранитов А-типа петролого-геохимическими характеристиками пород, которые кристаллизовались из высокотемпературных и водоненасыщенных магм, обогащенных главным образом щелочами, железом и некогерентными элементами.

Время их внедрения, зафиксированное по U-Pb датировкам циркона и монацита, представлено двумя пиками – 1380–1360 и 800–720 млн лет, контролируруемыми процесса-

ми растяжения коры в пределах крупных линейментных структур региона [Likhanov, Santosh, 2019]. Ранние события синхронны с процессами извержения пикробазальт-базальтовых туфов и лав, формированием рапакивиподобных гранитов и ассоциирующих субвулканических тел габбродолеритов и пикритоидов Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса Енисейского кряжа и с одновозрастными событиями на других материках. Активизация магматической деятельности и сопутствующий рифтогенез на рубеже нижнего и среднего рифея на западной окраине Сибирского кратона и в других континентальных блоках маркируют заключительные стадии распада предполагаемого палеомезопротерозойского суперконтинента Нуна, продолжающиеся вплоть до начала гренвильских событий. Постгренвильские этапы эволюции орогена и начальные процессы растяжения фиксируются дайковыми роями бимодальных ассоциаций анорогенных гранитоидов и внутриплитных базитов с возрастными внедрения 797–792 млн лет, происходившего несколько позднее кульминационного этапа коллизионного метаморфизма [Likhanov, Santosh, 2017]. Последующее развитие региона контролировалось многократным проявлением рифтогенного магматизма, связанного с проявлением плюмовой активности, обусловившей распад суперконтинента Родинии и раскрытие Палеоазиатского океана [Likhanov et al., 2018]. В ТИСЗ выделено несколько эпох (0,78–0,65 млрд лет) формирования рифтогенных структур, сопровождавшихся внутриплитным бимодальным, субщелочным кислым, основным и щелочным вулканизмом и интрузивным магматизмом [Лиханов и др., 2021]. В ПРСЗ наиболее широко проявился бимодальный риолит-базальтовый и субщелочной лейкогранитный магматизм с возрастом 720–750 млн лет [Ножкин и др., 2016].

Синхронность магматической активности и схожая последовательность тектоно-термальных событий на арктической окраине Нуны и Родинии (рис.) подтверждают территориальную близость Сибири и кратонов Северной Атлантики (Лаврентии и Балтики) в широком диапазоне времени (1,38–0,72 млрд лет), что согласуется с современными палеомагнитными реконструкциями положения суперконтинен-



Реконструкция ядра суперконтинента Нуна в интервале времени 1740–1270 млн лет (а) и конфигурация ядра Родинии и расположение подвижных поясов гренвильской складчатости, показанных голубым цветом (1100–850 млн лет назад) (b)

Reconstruction of the Nuna supercontinent core in the time interval 1740–1270 Ma (a) and paleotectonic reconstructions of the mobile belts position in the configuration of the Rodinia supercontinent core with the distribution of the Grenvillian (in blue) orogens (1100–850 Ma) (b)

тов [Torsvik, 2003; Evans, Mitchell, 2011] и временными диапазонами формирования крупных изверженных провинций [Ernst et al., 2016]. Возрастной интервал между этими процессами (~650 млн лет) коррелирует с длительностью суперконтинентальных циклов, начинающихся со стадии рифтогенеза и распада предшествующего суперконтинента до распада нового суперконтинента. Эти магматические события хорошо сопоставляются с этапами распада суперконтинентов Нуны и Родинии.

## Литература

Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Козлов П. С. Гренвильские 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. № 1. С. 412–465. doi: 10.31857/S0016853X21010070

Ножкин А. Д., Туркина О. М., Лиханов И. И., Дмитриева Н. В. Позднепалеопротерозойские вулканические ассоциации на юго-западе Сибирского кратона (Ангаро-Канский блок) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 2. С. 312–332. doi: 10.15372/GiG20160203

Ernst R. E., Hamilton M. A., Soderlund U., Hanes J. A., Gladkochub D. P., Okrugin A. V., Kolotilina T.,

Mekhonoshin A. S., Bleeker W., LeCheminant A. N., Buchan K. L., Chamberlain K. R., Didenko A. M. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // Nature Geoscience. 2016. Vol. 9. P. 464–469. doi: 10.1038/NGEO2700

Evans D. A. D., Mitchell R. N. Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic–Mesoproterozoic supercontinent Nuna // Geology. 2011. Vol. 39. P. 443–446. doi: 10.1130/G31654.1

Likhanov I. I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // Precambrian Res. 2017. Vol. 300. P. 315–331. doi: 10.1016/j.precamres.2017.08.019

Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: Implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Res. 2019. Vol. 328. P. 128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018

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. P. 743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // Lithos. 2018. Vol. 304–307. P. 468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

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

## References

Ernst R. E., Hamilton M. A., Soderlund U., Hanes J. A., Gladkochub D. P., Okrugin A. V., Kolotilina T., Mekhonoshin A. S., Bleeker W., LeCheminant A. N., Buchan K. L., Chamberlain K. R., Didenko A. M. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic. *Nat. Geosci.* 2016;9:464–469. doi: 10.1038/NGE02700

Evans D. A. D., Mitchell R. N. Assembly and breakup of the core of Paleoproterozoic–Mesoproterozoic supercontinent Nuna. *Geology.* 2011;39:443–446. doi: 10.1130/G31654.1

Likhanov I. I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: Implications for breakup of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Res.* 2017;300:315–331. doi: 10.1016/j.precamres.2017.08.019

Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: Implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia. *Precambrian Res.* 2019;328: P. 128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018

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;22:743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean. *Lithos.* 2018;304–307:468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

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., 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

Nozhkin A. D., Turkina O. M., Likhanov I. I., Dmitrieva N. V. Late paleoproterozoic volcanic associations in the Southwestern Siberian Craton (Angara-Kan block). *Russ. Geol. Geophys.* 2016;57(2):247–264. doi: 10.1016/J.RGG.2016.02.003

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

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Лиханов Игорь Иванович

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник  
лаборатории метаморфизма и метасоматоза

e-mail: likh@igm.nsc.ru

## CONTRIBUTOR:

### Likhanov, Igor

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher,  
Metamorphism and Metasomatism Laboratory

УДК 551.72; 551.24.056

## **НОВЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ГРЕНВИЛЬСКИХ И ВАЛЬГАЛЬСКИХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА НА ПРИМЕРЕ ГАРЕВСКОГО МЕТАКОМПЛЕКСА ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА**

**И. И. Лиханов**

*Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3,  
Новосибирск, Россия, 630090)*

По результатам минералого-петрологических, геохимических и изотопно-геохронологических исследований получены данные по особенностям петрогенезиса, геотектоническим обстановкам и условиям формирования, возрастам метаморфизма и протолита контрастных по составу пород гаревского метаморфического комплекса. Установлены два импульса неопротерозойской эндогенной активности на западной окраине Сибирского кратона, связанные со становлением суперконтинента Родиния, коррелирующие с гренвильскими (930–900 млн лет) и постгрэнвильскими (880–845 млн лет) коллизивно-аккреционными процессами вальгальской складчатости.

Ключевые слова: геохимия; тектонические обстановки; U-Pb и  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возраст; Lu-Hf изотопная систематика цирконов; Енисейский кряж

Для цитирования: Лиханов И. И. Новые доказательства гренвильских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона на примере Гаревского метаконплекса Енисейского кряжа // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 77–80. doi: 10.17076/geo1682

Финансирование. Работа выполнена за счет средств гранта РФФ (проект № 21-77-20018).

### **I. I. Likhanov. NEW EVIDENCE FOR THE GRENVILLE AND VALHALLA TECTONIC EVENTS AT THE WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON: THE CASE OF THE GAREVKA METACOMPLEX, YENISEY RIDGE**

*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy  
of Sciences (3 Acad. Koptuyug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia)*

We report new data on the petrogenesis, tectonic settings, thermodynamic conditions, metamorphism and protolith ages for compositionally contrasting rocks of the Garevka metamorphic complex, obtained from the results of mineralogical-petrological, geochemical, and isotope-geochronological studies. Zircon SHRIMP U-Pb analyses coupled with  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating constrain the timing of two new pulses of Neoproterozoic en-

dogenous activity at the western margin of the Siberian Craton, associated with the Grenville (930–900 Ma) and the post-Grenville Valhalla (880–845 Ma) accretion-and-collision processes.

**Keywords:** geochemistry; tectonic settings; U-Pb and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating; Lu-Hf zircon isotope systematics; Yenisey Ridge

**For citation:** Likhanov I. I. New evidence for the Grenville and Valhalla tectonic events at the western margin of the Siberian Craton: the case of the Garevka metacomplex, Yenisey Ridge. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:77–80. doi: 10.17076/geo1682

**Funding.** The study was funded by Russian Science Foundation grant # 21-77-20018.

Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа, представляющего собой коллизионно-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 Родинии. Этот суперконтинент возник на рубеже мезо-неопротерозоя в результате гренвильского орогенеза, фиксировавшего закрытие позднемезопротерозойского океана: его заключительные деформации имели возраст 1,2–0,9 млрд лет [Богданова и др., 2009]. Ключевым для палеоконтинентальных реконструкций неопротерозойского этапа эволюции Родинии также является вальгальский ороген [Sawood et al., 2010], сформировавшийся в диапазоне гренвильского и постгренвильского циклов, включающих эпохи Ренланд (980–910 млн лет) и Нордатьян (880–720 млн лет).

С другой стороны, 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» (boring billion), в ряде работ сделан вывод об отсутствии на Енисейском кряже гренвильских коллизионных событий (например, [Верниковский, Верниковская, 2006]). Это привело к противоречивой трактовке ключевых вопросов геологической эволюции региона.

Мы считаем, что проблемы оценки геохронологических рубежей в истории суперконтинента Родиния во многом 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 [Лиханов и др., 2014].

Попытка восполнения этого пробела принята в настоящей статье, где приведены

геохронологические доказательства ранне-неопротерозойских событий в эволюции докембрийских комплексов Енисейского кряжа. Такие исследования важны не только для понимания процессов, сформировавших тектонический облик региона, но и для решения широко дискутируемого вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав древнего суперконтинента Родиния.

Наименее изученной является северо-западная часть Енисейского кряжа, сложенная древнейшими в Заангарье породами гаревского метаморфического комплекса (ГМК). Эти интенсивно метаморфизованные толщи, расположенные в пределах Приенисейской региональной сдвиговой зоны, составляют инфраструктуру (наиболее глубокие уровни) коллизионной системы [Likhanov et al., 2018]. В строении этого комплекса принимают участие серые биотитовые плагиогнейсы немтихинской толщи, которые выше по разрезу сменяются порфиробластическими плагиогнейсами, кристаллическими сланцами и гнейсами с широким развитием лейкогранитов, пегматитов, рапакиви- и адакитоподобных гранитов, мигматитов, амфиболитов и метатерригенно-карбонатных пород (кварцитов, кальцифиров, мраморов) малогаревской толщи [Likhanov et al., 2004].

В развитии этого комплекса были выделены три этапа [Likhanov et al., 2015]. На первом этапе сформировались зональные комплексы низких давлений And-Sil типа гренвильского возраста при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте  $dT/dH = 25\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$  [Likhanov et al., 2019]. На втором этапе эти породы подверглись неопротерозойскому (~800 млн лет) коллизионному метаморфизму умеренных давлений Ky-Sil типа с низким  $dT/dH \leq 12\text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$  [Likhanov, Santosh, 2020]. Заключительные стадии развития коллизионного орогена в регионе маркируются дайковыми роями бимодального пояса, представленного анорогенными грани-

тоидами и внутриплитными базитами рифтогенной природы с возрастными внедрения 797–792 млн лет, фиксирующими начало распада Родинии [Likhanov, Santosh, 2017, 2019].

В рамках настоящих исследований получены новые геологические, геохимические и изотопно-геохронологические данные по петрогенезису, геотектоническим обстановкам формирования, термодинамическим условиям, возрастам метаморфизма и протолита для контрастных по составу пород ГМК – порфиروбластических гранитогнейсов, микроклин-цоизитовых ортоамфиболитов, рапакиви- и адакитоподобных гранитов, плагиогранитогнейсов, мигматитов и ортоклазовых лейкогранитогнейсов. Обсуждены возможные модели и геодинамические обстановки их формирования.

Установлены два новых импульса неопротерозойской эндогенной и тектонической активности на западной окраине Сибирского кратона (930–900 и 880–845 млн лет), коррелирующие с гренвильскими и постгренвильскими ранними коллизионно-аккреционными процессами вальгальской складчатости, с которыми связано становление суперконтинента Родиния.

Синхронность магматической и деформационно-метаморфической активности, а также схожая последовательность однотипных тектоно-термальных событий на арктической окраине Родинии подтверждают территориальную близость Сибири и кратонов Северной Атлантики (Лаврентии и Балтики) в диапазоне времени (0,93–0,85 млрд лет), что согласуется с современными палеомагнитными реконструкциями положения суперконтинентов. Новые доказательства гренвильских коллизионных событий в комплексе с другими возрастными эквивалентами в пределах западной окраины Сибирского кратона и палеоконтинентальными реконструкциями позволяют разрешить ряд противоречий в трактовке ключевых вопросов геологии региона, например, предположения об отсутствии на Енисейском крыже гренвильских коллизионных событий.

## Литература

Богданова С. В., Писаревский С. А., Ли Ч. Х. Образование и распад Родинии (по результатам МПГК 440) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2009. Т. 17, no. 3. С. 29–45.

Верниковский В. А., Верниковская А. Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского крыжа // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. С. 35–52.

Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Козлов П. С. Гренвильские тектонические события и эволюция Енисейского крыжа, западная окраина Си-

бирского кратона // Геотектоника. 2014. Т. 48, № 5. С. 32–53. doi: 10.7868/S0016853X1405004X

Cawood P. A., Strachan R., Cutts K., Kinny P. D., Hand M., Pisarevsky S. Neoproterozoic orogeny along the margin of Rodinia: Valhalla orogen, North Atlantic // *Geology*. 2010. Vol. 38. P. 99–102. doi: 10.1130/G30450.1

Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia / *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts* // Geol. Society, London, Special Publications. 2019. Vol. 478. P. 89–115. doi: 10.1144/SP478.11

Likhanov I. I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // *Precambrian Res.* 2017. Vol. 300. P. 315–331. doi: 10.1016/j.precamres.2017.08.019

Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // *Precambrian Res.* 2019. Vol. 328. P. 128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018

Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // *Geological Journal*. 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 // *Journal of Metamorphic Geology*. 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 polymetamorphic complexes in the Yenisey Ridge, East Siberia: implications for Neoproterozoic paleocontinental reconstructions // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. Vol. 113. P. 391–410. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.026

Likhanov I. I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // *Lithos*. 2018. Vol. 304–307. P. 468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

## 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

Cawood P. A., Strachan R., Cutts K., Kinny P. D., Hand M., Pisarevsky S. Neoproterozoic orogeny along the margin of Rodinia: Valhalla orogen, North Atlantic. *Geology*. 2010;38:99–102.

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. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamor-

phism of Yenisei Ridge, Siberia. *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts. Geol. Society, London, Special Publications.* 2019;478:89–115. doi: 10.1144/SP478.11

Likhanov I. I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Res.* 2017;300:315–331. doi: 10.1016/j.precamres.2017.08.019

Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia. *Precambrian Res.* 2019;328:128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018

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. *Journal of Metamorphic Geology.* 2004;22:743–762. doi: 10.1111/j.1525-1314.2004.00546.x

Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Khiler 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.jseaes.2014.10.026

Likhanov I. I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean. *Lithos.* 2018;304-307:468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

Vernikovskiy V. A., Vernikovskaya A. E. Tectonics and evolution of granitoid magmatism in the Yenisei Ridge. *Russian Geology and Geophysics.* 2006;47(1):32–50.

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Лиханов Игорь Иванович**

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник  
лаборатории метаморфизма и метасоматоза

e-mail: likh@igm.nsc.ru

#### CONTRIBUTOR:

**Likhanov, Igor**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Metamorphism  
and Metasomatism Laboratory



УДК 551.251:551.24

## **РЕКОНСТРУКЦИЯ P-T-t ТРЕНДОВ И ТЕКТОНО-ТЕРМАЛЬНЫХ ПРИЧИН МЕТАМОРФИЗМА В ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ КОЛЛИЗИИ, РАСТЯЖЕНИЯ И СДВИГОВЫХ ЗОН ЗЕМНОЙ КОРЫ**

**И. И. Лиханов**

*Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева (пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090)*

Эффективным методом для выяснения тектоно-магматических причин метаморфизма являются реконструкции и анализ P-T-t трендов эволюции пород. Установлены диагностические P-T-t тренды, характерные для пород, сформированных в зонах активного тектогенеза – при растяжении и сжатии земной коры и в сдвиговых зонах. Приведено критическое обсуждение характера таких трендов – по или против часовой стрелки в полициклических комплексах со сложным развитием.

Ключевые слова: P-T-t тренды метаморфизма; тектонические обстановки

Для цитирования: Лиханов И. И. Реконструкция P-T-t трендов и тектоно-термальных причин метаморфизма в геодинамических обстановках коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 81–84. doi: 10.17076/geo1680

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

### **I. I. Likhanov. RECONSTRUCTION OF P-T-t PATHS AND TECTONOMAGMATIC REASONS OF METAMORPHISM FOR COLLISION, EXTENSION, AND SHEAR ZONE GEODYNAMIC SETTINGS OF THE EARTH'S CRUST**

*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia)*

An effective method for identifying tectonomagmatic causes of metamorphism is the reconstruction and analysis of P-T-t paths, which can be used to develop a tectonic model of rock evolution over time. Diagnostic P-T-t paths characteristic of rocks formed in zones of active tectogenesis – under collision, extension and in shear zones of the Earth's crust – were identified. This paper discusses some of the ambiguous interpretations of P-T-t paths in areas with simultaneous manifestation of different metamorphic processes.

Keywords: P-T-t paths of metamorphic evolution; tectonic settings

For citation: Likhonov I. I. Reconstruction of P-T-t paths and tectonomagmatic reasons of metamorphism for collision, extension, and shear zone geodynamic settings of the Earth's crust. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:81–84. doi: 10.17076/geo1680

Funding. The study was supported by Russian Science Foundation grant # 21-77-20018.

Реконструкция и анализ P-T-t трендов эволюции пород широко применяются при интерпретации эволюции орогенов с полициклической историей, где разные типы метаморфизма сочетаются между собой в контрастных геодинамических обстановках. В настоящей работе эти вопросы обсуждаются на примере геологических комплексов Енисейского кряжа, в составе которых исследованы проявления регионально-го LP/HT и УНТ гранулитового метаморфизма, коллизионного MP/HT и HP/LT метаморфизма, связанных с надвигами и субдукцией, и стресс-метаморфизма при деформациях пород.

В Заангарье Енисейского кряжа на первом этапе сформировались зональные комплексы низких давлений And-Sil типа гренвильского

возраста при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте  $dT/dH = 25\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$  [Likhonov et al., 2019]. На втором этапе эти породы подверглись неопротерозойскому коллизионному метаморфизму умеренных давлений Ky-Sil типа, в результате чего происходило прогрессивное замещение  $\text{And} \rightarrow \text{Ky} \pm \text{Sil}$  [Likhonov, Santosh, 2020]. Формирование более древних пород тейского комплекса происходило в результате надвигов со стороны Сибирского кратона на рубеже 850 млн лет [Likhonov et al., 2004]. Поздний коллизионный метаморфизм пород гаревского комплекса контролировался встречными движениями в ходе аккреционных событий вальгальской складчатости (~800 млн лет) [Likhonov, 2019] (рис. 1, а).

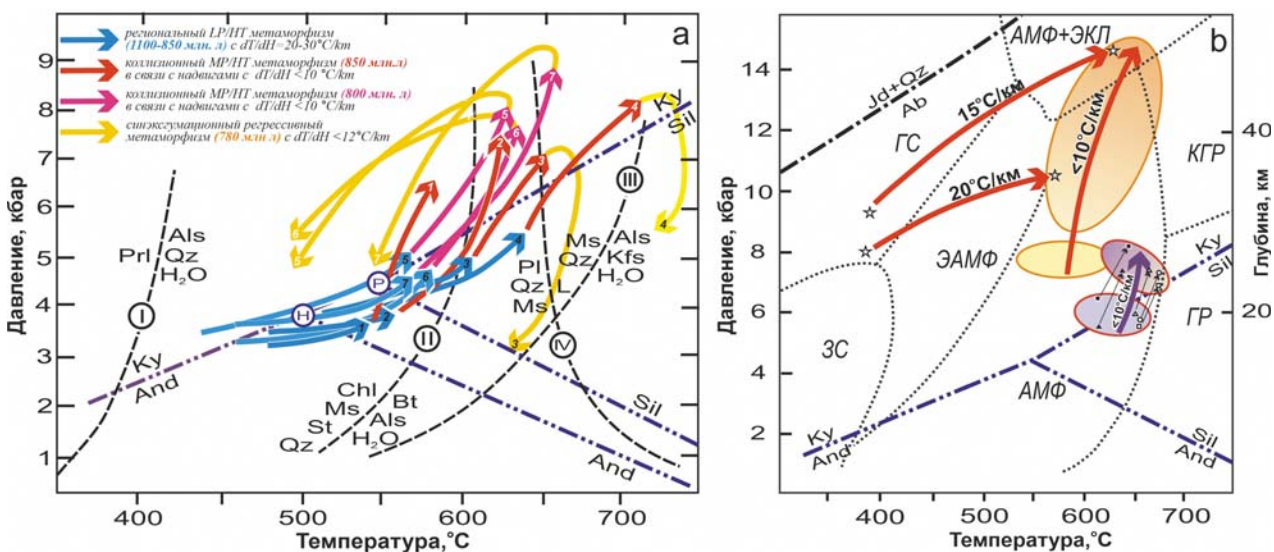


Рис. 1. P-T-t тренды эволюции метаморфизма для метапелитов тейского (1–4) и гаревского (5–7) комплексов Заангарья (а) и для тектонитов ПРСЗ (б)

Fig. 1. P-T-t diagrams showing the generalized P-T path calculations for metapelites in the Teya and Garevka complex (a) and for tectonites of YRSZ (b)

Низкий метаморфический градиент от 7 до 14  $^\circ\text{C}/\text{км}$  обусловлен утолщением земной коры в результате быстрого надвига с последующим быстрым подъемом пород при скоростях процессов около 1–10 мм/год [Likhonov et al., 2015]. Различия в направлении движения регрессив-

ных ветвей, определяющих итоговую траекторию P-T-t трендов, контролируются разными скоростями и механизмами эксгумации: эрозивной денудацией перекрывающих комплексов («по часовой стрелке», CW) или тектонической транспортировкой при растяжении земной коры

(«против часовой стрелки», CCW). Декомпрессионное остывание с низким  $dT/dH \leq 12$  °С/км пород гаревского комплекса могло быть связано с быстрой тектонической эксгумацией при растяжении и утонении коры, обеспечивающей резкий сброс давления не успевающей остыть среды (рис. 1, а), что подтверждается их синхронностью с рифтогенными продуктами бимодального магматизма [Likhanov, Santosh, 2017, 2019]. Комплексы с субизобарическим остыванием образуются в условиях длительного охлаждения на средне-нижнекоровых уровнях глубинности. В качестве примера приведена эволюция P-T параметров с ходом «против

часовой стрелки» при высоком градиенте до 200 °С/кбар, указывающая на развитие УНТ парагенезисов Ангаро-Канского блока при сильном, 900–1000 °С, прогреве с последующим субизобарическим остыванием (рис. 2, а). Такие условия отвечают обстановкам внутриплитного растяжения, сопровождаемого андерплейтингом базитовых расплавов в связи с предполагаемой активностью Тимптонского мантийного плюма (~1750 млн лет) [Лиханов и др., 2016]. Рассчитанные значения температур хорошо согласуются с условиями формирования УНТ гранулитов сапфиринасодержащих гранулитов Анабарского щита (рис. 2, b) [Ножкин и др., 2019].

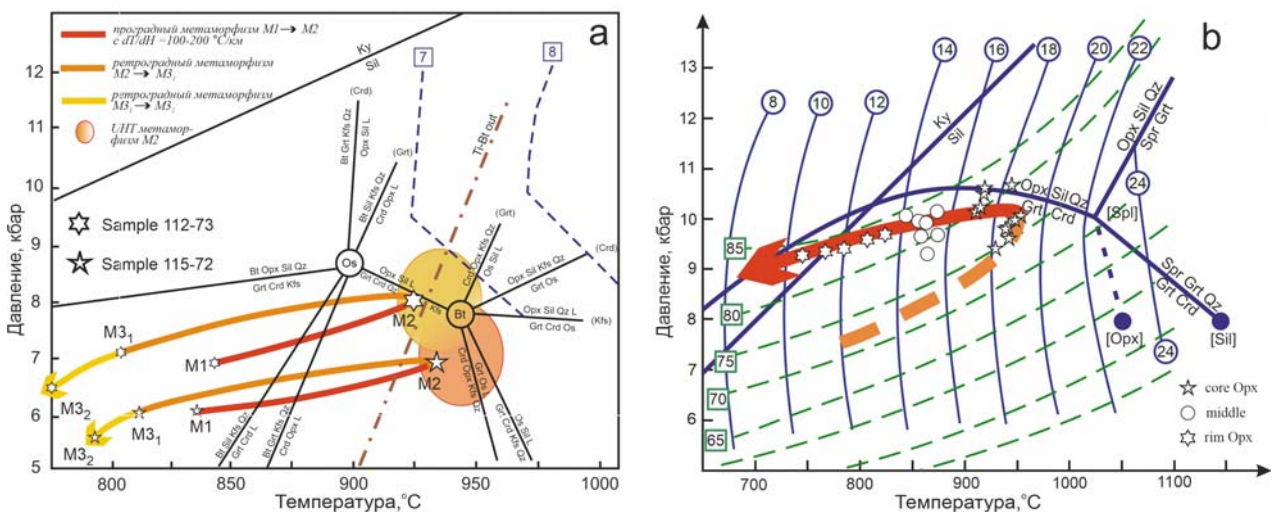


Рис. 2. P-T-t тренды УНТ гранулитов канского комплекса Южно-Енисейского края (а) и Анабарского щита с движением «против часовой стрелки» (b)

Fig. 2. Counterclockwise P-T-t path for UHT granulites of the Angara-Kan block (a) and for sapphirine-bearing granulites of the Anabar Shield (b)

В пределах Приенисейской региональной сдвиговой зоны (ПРСЗ) породы подвергались интенсивным деформациям с перекристаллизацией субстрата и образованием высокобарических тектонитов (рис. 1, b) [Likhanov et al., 2018]. Полихронный динамометаморфизм происходил с повышением давления на 1,5–3 кбар при низком  $dT/dH < 10$  °С/км в сравнении с фоновыми значениями регионального метаморфизма, что, вероятно, было обусловлено утолщением земной коры в результате быстрого надвига/субдукции с последующим быстрым подъемом пород. Максимальные превышения давления на 3–5 кбар и температуры на 180–240 °С при более высоком градиенте  $dT/dH = 15–20$  °С/км установлены в тектонитах базитового состава с релик-

товыми глаукофансланцевыми ассоциациями (рис. 1, b). Такие превышения P-T параметров связаны с прогрессивным метаморфизмом, осложненным локальным разогревом пород при вязких деформациях и превышением тектонического давления над литостатическим в зонах пластического сдвига [Лиханов, 2020].

### Литература

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., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Крылов А. А., Козлов П. С., Хиллер В. В. Метаморфическая эволюция ультравысокотемпературных

железисто-глиноземистых гранулитов Южно-Енисейского кряжа и тектонические следствия // Петрология. 2016. Т. 24, № 4. С. 423–440. doi: 10.7868/S0869590316030055

Ножкин А. Д., Лиханов И. И., Савко К. А., Крылов А. А., Серов П. А. Сапфиринсодержащие гранулиты Анабарского щита // Геохимия. 2019. Т. 64, № 5. С. 486–502. doi: 10.31857/S0016-7525645486-502

Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia / Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts // Geol. Society, London, Special Publications. 2019. Vol. 478. P. 89–115. doi: 10.1144/SP478.11

Likhanov I. I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent // Precambrian Res. 2017. Vol. 300. P. 315–331. doi: 10.1016/j.precamres.2017.08.019

Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Res. 2019. Vol. 328. P. 128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018

Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // Geological Journal. 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 polymetamorphic 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

Likhanov I. I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // Lithos. 2018. Vol. 304–307. P. 468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

## References

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., Nozhkin A. D., Reverdatto V. V., Krylov A. A., Kozlov P. S., Khiller V. V. Metamorphic evolution of ultrahigh-temperature Fe- and Al-rich granulites in the South Yenisei Ridge and tectonic implications. *Petrology*. 2016;24(4):392–408. doi: 10.1134/S086959111603005X

Nozhkin A. D., Likhanov I. I., Savko K. A., Krylov A. A., Cerov P. A. Sapphirine-bearing granulites of the Anabar Shield. *Geochemistry International*. 2019;57(5):524–539. doi: 10.1134/S0016702919050070

Likhanov I. I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts*. *Geol. Society, London, Special Publications*. 2019;478:89–115. doi: 10.1144/SP478.11

Likhanov I. I., Santosh M. Neoproterozoic intraplate magmatism along the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Rodinia supercontinent. *Precambrian Res.* 2017;300:315–331. doi: 10.1016/j.precamres.2017.08.019

Likhanov I. I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia. *Precambrian Res.* 2019;328:128–145. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.018

Likhanov I. I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited. *Geological Journal*. 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. Metamorphic Geol.* 2004;22:743–762. 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 polymetamorphic 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

Likhanov I. I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean. *Lithos*. 2018;304–307:468–488. doi: 10.1016/j.lithos.2018.02.021

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Лиханов Игорь Иванович

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник  
лаборатории метаморфизма и метасоматоза

e-mail: likh@igm.nsc.ru

## CONTRIBUTOR:

### Likhanov, Igor

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Metamorphism  
and Metasomatism Laboratory

УДК 55 (084.3)

## БЕЛОМОРСКИЙ ПОДВИЖНЫЙ ПОЯС В СОСТАВЕ СУПЕРКОНТИНЕНТА НУНА/КОЛУМБИЯ: НОВЫЕ ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Н. В. Лубнина<sup>1\*</sup>, А. И. Слабунов<sup>2</sup>, А. В. Степанова<sup>2</sup>, Н. С. Нестерова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991), \*natalia.lubnina@gmail.com

<sup>2</sup> Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Анализ истории формирования Беломорского подвижного пояса (БПП) позволял предполагать, что метаморфические преобразования габброидов сопровождались их перемагничиванием, а латеральные вариации компонент намагниченности могут нести информацию о временной последовательности вывода в верхние уровни коры западного форланда Лапландско-Кольского орогена (ЛКО). Становление последнего происходило в период сборки суперконтинента Нуна/Колумбия. В результате комплексных исследований метаморфизованных палеопротерозойских магматических комплексов документально установлен закономерный тренд перемагничивания в породах БПП. Показано, что фронт перемагничивания распространялся здесь с северо-запада на юго-восток, и он, вероятно, связан с особенностями коллизионных процессов при формировании ЛКО. Кроме того, в южной части БПП и ЮВ Карельского кратона установлено перемагничивание, возраст которого оценивается в 1,65–1,60 млрд лет, связанное, вероятно, с завершающими эпизодами становления Свекофеннского орогена.

Ключевые слова: Беломорский подвижный пояс; палеопротерозой; суперконтинент; Нуна/Колумбия; палеомагнетизм; геодинамические реконструкции; перемагничивание

Для цитирования: Лубнина Н. В., Слабунов А. И., Степанова А. В., Нестерова Н. С. Беломорский подвижный пояс в составе суперконтинента Нуна/Колумбия: новые палеомагнитные и геологические данные // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 85–90. doi: 10.17076/geo1663

## N. V. Lubnina<sup>1\*</sup>, A. I. Slabunov<sup>2</sup>, A. V. Stepanova<sup>2</sup>, N. S. Nesterova<sup>2</sup>. BELOMORIAN MOBILE BELT AS PART OF THE NUNA/COLUMBIA SUPERCONTINENT: NEW PALEOMAGNETIC AND GEOLOGICAL DATA

<sup>1</sup> M. V. Lomonosov Moscow State University, Department of Geology (1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia), \*natalia.lubnina@gmail.com

<sup>2</sup> Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

Analysis of the evolution of the Belomorian Mobile Belt (BMB) suggests that the metamorphism of gabbroic rocks was accompanied by their remagnetization and that lateral variations in magnetization constituents carry evidence for the time sequence of the extension of the western foreland of the Lapland-Kola orogen (LKO) to upper crustal levels. The latter formed during the Nuna/Columbia Supercontinent assembly. An integrated study of metamorphosed Paleoproterozoic igneous complexes revealed a remagnetization trend in BMB rocks. The study showed that the remagnetization front spread from the north-west to the south-east and that it is likely to be due to the collision pattern upon LKO formation. In addition, remagnetization was revealed in the southern BMB and in the southeastern Karelian Craton, dated at 1.65–1.60 Ga. It seems to be due to the final episodes of the Svecofennian orogen formation.

Keywords: Belomorian Mobile Belt; Paleoproterozoic; supercontinent; Nuna/Columbia; paleomagnetism; geodynamic reconstructions; remagnetization

For citation: Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Nesterova N. S. Belomorian Mobile Belt as part of the Nuna/Columbia Supercontinent: new paleomagnetic and geological data. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:85–90. doi: 10.17076/geo1663

Беломорский подвижный пояс (БПП) Фенно-скандинавского щита (рис.) – крупная структура, расположенная между Карельским архейским кратоном и ядром палеопротерозойского Лапландско-Кольского коллизионного орогена [Ранний..., 2005; Слабунов, 2008]. В настоящее время многими исследователями БПП рассматривается как форланд Лапландско-Кольского орогена, а его тектоническая структура – как суперпозиция неоархейских и палеопротерозойских тектонических процессов [Ранний..., 2005; Слабунов и др., 2021].

БПП сложен главным образом мезо- и неоархейскими мигматизированными гранито-гнейсами, метавулканогенными и парагнейсовыми комплексами. Его отличительные черты – неоднократное проявление интенсивных деформаций и метаморфизма в обстановке повышенного и умеренного давления как в неоархее, так и в палеопротерозое [Слабунов, 2008 и ссылки в этой работе]. Граница БПП со смежными структурами окончательно сформировалась в палеопротерозое, а результаты датирования ультраметаморфических мигматитовых комплексов указывают на формирование ее в период 1,94–1,88 млрд лет [Слабунов и др., 2016].

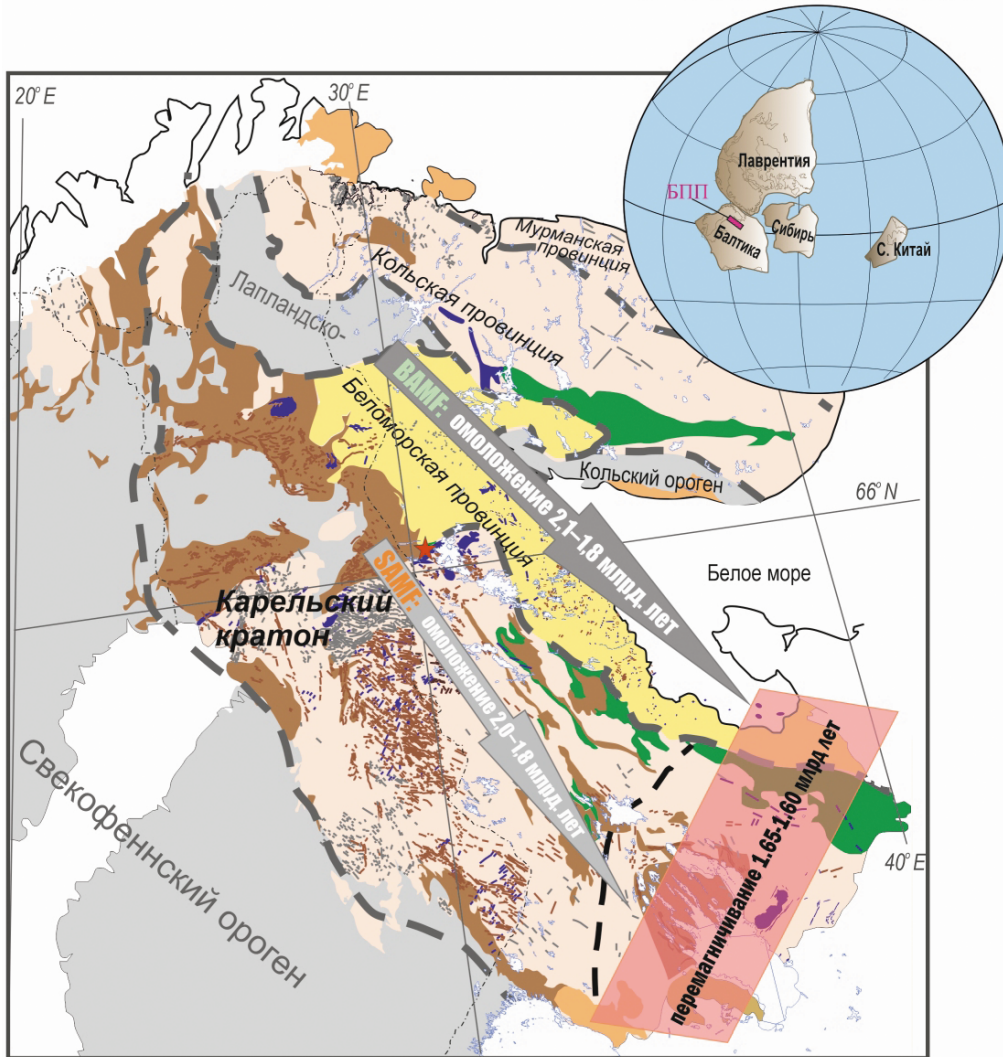
Характерной особенностью БПП является широкое распространение в его пределах палеопротерозойских интрузивных образований, возраст которых варьирует от 2,50 до 2,12 млрд лет [Stepanova et al., 2021]. Среди палеопротерозойских интрузивных комплексов БПП установлены дайки и довольно крупные интрузивы (например, Ковдозерский, Кийостровский), но наиболее характерными и преобладающими являются небольшие фрагменты интрузивов. Их характерные особенности – линзовидная

форма, тектонизированные контакты, расщелачивание пород эндоконтактной части, которое субсогласно с гнейсовидностью вмещающих пород.

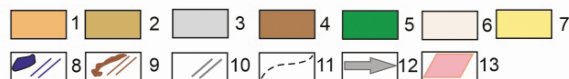
Наиболее распространенными среди палеопротерозойских габброидов БПП являются дайки и малые интрузии комплекса лерцоцитов-габброноритов [Степанов, 1981], время формирования которого оценивается в 2,43–2,39 млрд лет [Stepanova et al., 2021 и ссылки в этой работе]. Породы этого комплекса выделяются среди других палеопротерозойских интрузивных образований БПП тем, что часто сохраняют реликты первичных магматических структур и минералов, а также фрагменты первичных магматических контактов с вмещающими породами. Вторая группа габброидов, широко распространенная в БПП, – высокожелезистые базиты (гранатовые или коронитовые метагаббро) [Степанов, 1981], возраст которых по единичным определениям оценивается в 2,12–2,18 млрд лет [Stepanova, Stepanov, 2010; Березин, Скублов, 2014]. Железистые базиты в БПП не сохраняют (или крайне редко сохраняют) реликты первичных минералов и сложены преимущественно метаморфическими клинопироксеном, плагиоклазом, амфиболом и гранатом, но в них часто диагностируются реликты магматических структур. Палеопротерозойские габброиды других возрастных групп распространены в БПП ограниченно [Stepanova et al., 2021 и ссылки в этой работе].

Степень метаморфических преобразований в палеопротерозойских габброидах БПП варьирует от эклогитовой [Слабунов и др., 2011; Березин и др., 2012] до умеренно-барической амфиболитовой/гранулитовой фации [Ранний..., 2005].

**НУНА/КОЛУМБИЯ (1.65 - 1.60 млрд. лет)**



**Условные обозначения:**



Палеопротерозойское перемагничивание в породах БПП и Карельского кратона Фенноскандинавского щита. На врезке: реконструкция суперконтинента Нуна/ Колумбия (1,65–1,60 млрд лет) и расположение БПП:

1 – осадочные комплексы и граниты рапакиви 1,58–1,48 млрд лет; 2 – вулканогенно-осадочные комплексы 1,80–1,66 млрд лет; 3 – Лапландско-Кольский и Свектофеннский орогены, 1,8–2,0 млрд лет; 4 – вулканогенно-осадочные комплексы 2,3–1,8 млрд лет; 5 – вулканогенно-осадочные комплексы 2,5–2,3 млрд лет; 6 – вулканогенно-осадочные комплексы и магматические породы > 2,5 млрд лет; 7 – архейские комплексы Беломорского подвижного пояса; 8 – основные интрузивные породы 2,5–2,3 млрд лет; 9 – основные магматические породы 2,3–1,98 млрд лет; 10 – нерасчлененные мафические дайки > 1,98 млрд лет; 11 – границы террейнов Карельского кратона; 12 – тренды палеопротерозойского перемагничивания: в БПП (BAMF) и сопряженной части Карельского кратона (SAMF); 13 – перемагничивание 1,65–1,60 млрд лет

Paleoproterozoic remagnetization in the BMB and Karelian Craton rocks of the Fennoscandian Shield. Inset: reconstruction of the 1.65–1.60 Ga Nuna/Columbia Supercontinent and BMB location:

1 – 1.58–1.48 Ga sedimentary complexes and rapakivi granites; 2 – 1.80–1.66 Ga volcanic-sedimentary complexes; 3 – 1.8–2.0 Ga Lapland-Kola and Svecofennian orogens; 4 – 2.3–1.8 Ga volcanic-sedimentary complexes; 5 – 2.5–2.3 Ga volcanic-sedimentary complexes; 6 – >2.5 Ga volcanic-sedimentary complexes and igneous rocks; 7 – Archean complexes of the Belomorian Mobile Belt; 8 – 2.5–2.3 Ga mafic intrusive rocks; 9 – 2.3–1.98 Ga mafic igneous rocks; 10 – >1.98 Ga undivided mafic dikes; 11 – Karelian Craton terrain boundaries; 12 – Paleoproterozoic remagnetization trends: in BMB (BAMF) and in the conjugate portion of the Karelian Craton (SAMF); 13 – 1.65–1.60 Ga remagnetization

Определена зональность степени их преобразований [Степанов, 1981]: эцлогитизированные базиты установлены только в восточной и северо-восточной части БПП (район с. Гридино, Керетский архипелаг, Салмы), а вблизи границы с Карельским кратоном породы часто сохраняют реликты первичных минералов и метаморфические преобразования в них выражены в формировании тонких реакционных каем граната и амфибола. Метаморфические преобразования габброидов обусловили, как предполагалось, их перемагничивание, а латеральные вариации компонент намагниченности являются отражением временной последовательности вывода в верхние уровни коры западного форланда Лапландско-Кольского орогена. Становление последнего происходило в период сборки суперконтинента Нуна/Колумбия (рис., врезка).

Для определения пространственного распределения вторичных компонент намагниченности изучены объекты вдоль траверса Апатиты – Петрозаводск, который пересекает БПП с северо-востока на юго-запад под острым углом, и в южном Беломорье, на островах Онежской губы Белого моря между г. Беломорском на севере и г. Онега на юге. Объекты южного Беломорья, максимально удаленные от северной части Лапландско-Кольского орогена, расположены вблизи его предполагаемого юго-восточного продолжения [Самсонов и др., 2011]. Отдельное внимание было уделено изучению эцлогитизированных базитов в районе с. Гридино, где установлено несколько возрастных генераций эцлогитов, различающихся как по времени формирования эцлогитовых парагенезисов (архейских и палеопротерозойских), так и по составу и возрасту протолитов [Володичев и др., 2004; Слабунов и др., 2011, 2021; Максимов и др., 2022].

В результате комплексных исследований палеопротерозойских магматических комплексов установлен закономерный тренд перемагничивания [Lubnina et al., 2015, 2016]. Показано, что фронт перемагничивания распространялся с северо-запада на юго-восток, что хорошо согласуется с результатами изотопного датирования этих же комплексов (рис.). Полученный тренд перемагничивания, возможно, отражает особенности выведения в верхние части земной коры пород форланда Лапландско-Кольского коллизионного орогена [Ранний..., 2005] в ходе палеопротерозойской коллизии (рис.). Кроме того, в южной части БПП и ЮВ Карельского кратона установлено перемагничивание (возраст которого оценивается в 1,65–1,60 млрд лет (рис.)), связанное, вероятно, с завершающими эпизодами становления Свекофеннского орогена.

Установлена зависимость процессов перемагничивания от состава пород [Lubnina et al., 2016; Lubnina, Tarasov, 2019]. Степень сохранности вторичных ранних и поздних компонент намагниченности, возможно, связана не только с составом протолитов, но и с различными условиями преобразований пород, в том числе их флюидонасыщенностью.

## Литература

Березин А. В., Травин В. В., Марин Ю. Б., Скублов С. Г., Богомолов Е. С. Новые данные о возрасте (U-Pb, Sm-Nd) и P-T параметрах эцлогитизации даек Fe-габбро района Гридино (Беломорский подвижный пояс) // ДАН. 2012. Т. 444(6). С. 644–649.

Володичев О. И., Слабунов А. И., Бибикина Е. В., Конилов А. Н., Кузенко Т. И. Архейские эцлогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология. 2004. Т. 12(6). С. 609–631.

Максимов О. А., Балаганский В. В., Слабунов А. И., Ларионов А. Н. Два этапа высокобарного метаморфизма в раннедокембрийских эцлогитах (район Гридино Беломорской провинции Фенноскандинавского щита): петрология и геохронология // Петрология. 2022. Т. 30, № 2. С. 140–165. doi: 10.31857/S0869590322020042

Ранний докембрий Балтийского щита / Ред. В. А. Глебовицкий. СПб.: Наука, 2005. 711 с.

Самсонов А. В., Третьяченко В. В., Носова А. А., Ларионова Ю. О., Лепехина Е. Н., Ларионов А. Н., Ипатьева И. С. Фундамент Архангельской алмазодной провинции как Ю-В часть Лапландско-Кольского коллизионного орогена // Гранулитовые и эцлогитовые комплексы в истории Земли: Мат-лы науч. конф. и путеводитель научных экскурсий. Петрозаводск, 2011. С. 196–198.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 298 с.

Слабунов А. И., Балаганский В. В., Щипанский А. А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эцлогитов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 648–675. doi: 10.15372/GiG2021116

Слабунов А. И., Азимов П. Я., Глебовицкий В. А., Жанг Л., Кевлич В. И. Архейская и палеопротерозойская мигматизации пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия // ДАН. 2016. Т. 467(1). С. 71–74. doi: 10.7868/S0869565216070239

Слабунов А. И., Володичев О. И., Скублов С. Г., Березин А. В. Главные стадии формирования палеопротерозойских эцлогитизированных габбро-норитов по результатам U-Pb (SHRIMP) датирования цирконов и изучения их генезиса // ДАН. 2011а. Т. 437(2). С. 238–242.

Степанов В. С. Основной магматизм докембрия Западного Беломорья. Л.: Наука, 1981. 216 с.



Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Bubnov A. Yu., Kosevich N. I., Novikova M. A., Tarasov N. A. The Paleoproterozoic remagnetization trend in rocks of the Belomorian Mobile Belt: Paleomagnetic and geologic evidence // *Moscow University Geology Bulletin*. 2016. Vol. 71, no. 5. P. 311–322. doi: 10.3103/S0145875216050082

Lubnina N. V., Tarasov N. A. A Paleomagnetic study of Sariolian conglomerates of the Onega Structure of the Karelian Protocraton: The problem of global Paleoproterozoic remagnetization // *Moscow University Geology Bulletin*. 2019. Vol. 74, no. 1. P. 15–26. doi: 10.3103/S0145875219010095

Lubnina N. V., Zakharov V. S., Novikova M. A., Vorontsova V. P. Paleoproterozoic remagnetization in the White Sea Mobile Belt, Karelia: Petro-paleomagnetic evidence and supercomputer modeling // *Moscow University Geology Bulletin*. 2015. Vol. 70, no. 2. P. 84–96. doi: 10.3103/S0145875215020052

Stepanova A. V., Stepanov V. S., Larionov A. N., Salnikova E. B., Samsonov A. V., Azimov P., Egorova S. V., Larionova Y. O., Sukhanova M. A., Kervinen A. V., Maksimov O. A. Relicts of Palaeoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen // *Geological Society. London Spec. Publ.* 2021a. Vol. 518. doi: 10.1144/SP518-2021-30

Stepanova A., Stepanov V. Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield // *Precambrian Res.* 2010. Vol. 183(3). P. 602–616. doi: 10.1016/j.precamres.2010.08.016

## References

Berezin A. V., Travin V. V., Marin Yu. B., Skublov S. G., Bogomolov E. S. New data on the age (U-Pb, Sm-Nd) and P-T parameters of eclogitization of Fe-gabbro dikes in the Gridino area (Belomorsk Mobile Belt). *Doklady Earth Sciences*. 2012;444(6):644–649. (In Russ.)

Glebovitskii V. A. (ed.). Early Precambrian of the Baltic Shield. St. Petersburg: Nauka; 2005. 711 p. (In Russ.)

Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Bubnov A. Yu., Kosevich N. I., Novikova M. A., Tarasov N. A. The Paleoproterozoic remagnetization trend in rocks of the Belomorian Mobile Belt: Paleomagnetic and geologic evidence. *Moscow University Geology Bulletin*. 2016;71(5):311–322. doi: 10.3103/S0145875216050082

Lubnina N. V., Tarasov N. A. A Paleomagnetic study of Sariolian Conglomerates of the Onega Structure of the Karelian Protocraton: The problem of global Paleoproterozoic remagnetization. *Moscow University Geology Bulletin*. 2019;74(1):15–26. doi: 10.3103/S0145875219010095

Lubnina N. V., Zakharov V. S., Novikova M. A., Vorontsova V. P. Paleoproterozoic remagnetization in the White Sea Mobile Belt, Karelia: Petro-paleomagnetic evidence and supercomputer modeling. *Moscow*

*University Geology Bulletin*. 2015;70(2):84–96. doi: 10.3103/S0145875215020052

Maksimov O. A., Balagansky V. V., Slabunov A. I., Larionov A. N. Two high-pressure metamorphic events in Early Precambrian eclogites of the Gridino Area (Belomorian Province of the Fennoscandian Shield): petrology and geochronology. *Petrology*. 2022;30(2):140–165. doi: 10.31857/S0869590322020042 (In Russ.)

Samsonov A. V., Tretyachenko V. V., Nosova A. A., Larionova Y. O., Lepekhina E. N., Larionov A. N., Ipatyeva I. S. The basement of the Arkhangelsk diamondiferous Province as the southeastern part of the Lapland-Kola collisional orogen. *Granulitovye i eklogitovye komplekсы v istorii Zemli: Mat-ly nauch. konf. i putevoditel' nauchnykh ekskursii = Granulite and eclogite complexes in the history of the Earth: Proceedings conf. and guide of scientific excursions*. Petrozavodsk; 2011. P. 196–198. (In Russ.)

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of the Archean Mobile Belts (on the example of the White Sea Province of the Fennoscandian Shield). Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. 298 p. (In Russ.)

Slabunov A. I., Balagansky V. V., Shchipansky A. A. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield, and the tectonic setting of eclogites. *Russian Geology and Geophysics*. 2021;62(5):525–546 doi: 10.2113/RGG20204266

Slabunov A. I., Kevlich V. I., Azimov P. Y., Glebovitskii V. A., Zhang L. Archean and palaeoproterozoic migmatizations in the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: petrology, geochronology, and geodynamic settings. *Doklady Earth Sciences*. 2016;467(1):259–263. doi: 10.1134/S1028334X16030077

Slabunov A. I., Volodichev O. I., Skublov S. G., Berezin A. V. Main stages of the formation of paleoproterozoic eclogitized gabbro-norite: evidence from U-PB (shrimp) dating of zircons and study of their genesis. *Doklady Earth Sciences*. 2011;437(1):396–400. doi: 10.1134/S1028334X11030202

Stepanov V. S. Basic magmatism of the Precambrian of the Western White Sea. Leningrad: Nauka; 1981. 216 p. (In Russ.)

Stepanova A. V., Stepanov V. S., Larionov A. N., Salnikova E. B., Samsonov A. V., Azimov P., Egorova S. V., Larionova Y. O., Sukhanova M. A., Kervinen A. V., Maksimov O. A. Relicts of Palaeoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen. *Geological Society. London Spec. Publ.* 2021a;518. doi: 10.1144/SP518-2021-30

Stepanova A., Stepanov V. Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield. *Precambrian Res.* 2010;183(3):602–616. doi: 10.1016/j.precamres.2010.08.016

Volodichev O. I., Slabunov A. I., Kuzenko T. I., Bibikova E. V., Konilov A. N. Archean eclogites in the Belomorian Mobile Belt, Baltic Shield. *Petrology*. 2004;12(6):540–560.

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Лубнина Наталия Валерьевна**

д-р геол.-мин. наук, профессор

*e-mail: natalia.lubnina@gmail.com*

### **Слабунов Александр Иванович**

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник,  
руководитель лаборатории геологии и геодинамики  
докембрия

*e-mail: slabunov@krc.karelia.ru*

### **Степанова Александра Владимировна**

канд. геол.-мин. наук, заместитель директора, ведущий  
научный сотрудник

*e-mail: stepanov@krc.karelia.ru*

### **Нестерова Наталья Сергеевна**

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник лаборатории  
геологии и геодинамики докембрия

*e-mail: nesterovan@krc.karelia.ru*

## **CONTRIBUTORS:**

### **Lubnina, Natalia**

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

### **Slabunov, Alexander**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Head of Geology  
Laboratory

### **Stepanova, Alexandra**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Deputy Director, Leading Researcher

### **Nesterova, Natalia**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Precambrian Geology  
and Geodynamics Laboratory

УДК 552.48+551.2 (470.22)

## **P-T-t ТРЕНДЫ МЕТАМОРФИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭКЛОГИТОВ ГРИДИНСКОГО КОМПЛЕКСА БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ (ОСТРОВ СТОЛБИХА И УЧАСТОК САМЫЛИНО)**

**О. А. Максимов**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

В ходе изучения эклогитов Гридинского комплекса Беломорской провинции установлена сложная история их метаморфических преобразований. Полиметаморфизм этих пород фиксируется по реликтам ранних и поздних высокобарных парагенезисов (омфациит+гранат), реакционным микроструктурам, изменению химической зональности граната, термобарометрическим расчетам и изотопно-геохронологическим исследованиям. Эти данные свидетельствуют о проявлении двух этапов эклогитового метаморфизма в Гридинском комплексе – в архее и палеопротерозое. В результате исследования получены два P-T-t тренда регрессивной стадии эволюции пород с последовательным переходом от эклогитовой фации к гранулитовой (амфиболитовой). Вблизи пика метаморфизма первого тренда формируются метаморфогенные цирконы с возрастом 2,7 млрд лет, а второго – 1,9 млрд лет.

Ключевые слова: P-T-t тренд; метаморфизм; эклогит; архей; Беломорская провинция

Для цитирования: Максимов О. А. P-T-t тренды метаморфического преобразования эклогитов Гридинского комплекса Беломорской провинции (остров Столбиха и участок Самылино) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 91–94. doi: 10.17076/geo1672

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГ КарНЦ РАН АААА-А18-118020290085-4.

### **O. A. Maksimov. P-T-t TRENDS IN THE METAMORPHIC TRANSFORMATION OF ECLOGITES IN THE GRIDINO COMPLEX OF THE BELOMORIAN PROVINCE (STOLBIKHA ISLAND AND SAMYLINO AREA)**

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

Eclogites in the Gridino complex of the Belomorian Province have a complex history of metamorphic transformations. Their polymetamorphism is revealed from relics of early and late high-pressure mineral assemblages (omphacite+garnet), reaction microstructures, changes in garnet chemical zoning, results of thermobarometric calculations, and isotope-geochronological studies. Geochronological data indicate two stages of eclo-

gitic metamorphism in the Gridino complex in the Archean and the Paleoproterozoic era. As a result of the study, we obtained two P-T-t trends for the regressive stage of rock evolution with a successive transition from eclogitic facies to granulite (amphibolite). The peak of the first metamorphic event corresponds to metamorphic zircons aged 2.7 Ga. The maximal values of the P-T conditions during the second metamorphic event are reliably correlated with 1.9 Ga metamorphic zircons.

Keywords: P-T-t trend; metamorphism; eclogite; Archean; Belomorian Province

For citation: Maksimov O. A. P-T-t trends in the metamorphic transformation of eclogites in the Gridino complex of the Belomorian Province (Stolbikha Island and Samylyno area). *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:91–94. doi: 10.17076/geo1672

Funding. The study was funded within state-ordered research theme of the Institute of Geology KarRC RAS AAAA-A18-118020290085-4.

В Беломорской провинции Фенноскандинавского щита установлены раннедокембрийские эклогиты и продукты их ретроградного преобразования [Володичев и др., 2004; Mints et al., 2010]. Они входят в состав меланжей, типичным примером которых является Гридинский эклогитсодержащий комплекс, состоящий из мигматизированных ТТГ гнейсов и будинированных тел различного состава. Особенностью этих пород является сложная история метаморфических изменений, связанная с беломорской (2,72–2,66 млрд лет) и лапландско-кольской (1,94 – 1,90 млрд лет) коллизионными орогениями [Слабунов и др., 2021 и ссылки в ней].

Эклогиты являются важным источником информации о полиметаморфизме Гридинского комплекса в связи с их особенностями текстуры, микроструктуры и минерального состава. Наиболее изученные в настоящее время будинированные тела эклогитов находятся на острове Столбиха [Володичев и др., 2004; Слабунов и др., 2021 и ссылки в ней] и участке Самылино [Максимов и др., 2022]. Эти будины характеризуются ярко выраженным неоднородным внутренним строением, сформированным в результате неоднократно проявленных тектоно-метаморфических процессов. Неоднородность выражается в изменении характера деформаций, текстур пород и смене метаморфических минеральных парагенезисов. Жилы гранитного состава с возрастом около 2,68 и 1,88 млрд лет формируются в конце каждого цикла.

На основе петрологических и геохронологических исследований эклогитов установлены два этапа высокобарного метаморфизма: ранний – архейский с образованием эклогитов-I и поздний – палеопротерозойский с формированием эклогитов-II [Слабунов и др., 2021; Volodichev et al., 2021; Максимов и др., 2022].

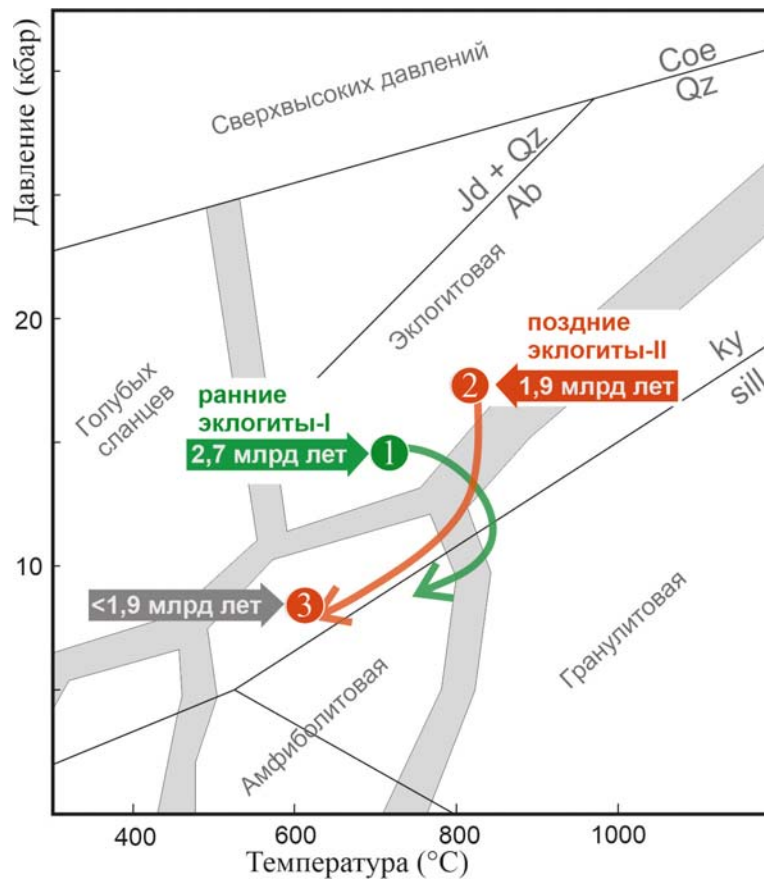
Эклогиты-I установлены по включениям Omp, Rt и Qz (сокращения минералов по: [Whitney, Evans, 2010]) в центральной части зерен граната и парагенетичным зернам метаморфического циркона с Grt-Omp включениями и возрастом около 2,7 млрд лет [Володичев и др., 2004; Volodichev et al., 2021]. Результаты термобарометрических расчетов указывают на их формирование при  $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P = 14$  кбар. Поздние изменения эклогитов-I связаны с формированием Grt-Cpx-Hbl-Bt-Pl-Qz минеральной ассоциации при снижении давления до 11 кбар и увеличении температуры до  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  в ходе декомпрессионного ретроградного изменения в условиях высокобарной гранулитовой фации.

Эклогиты-II на острове Столбиха и участке Самылино образуются по эклогитам-I, что подтверждается присутствием ранних включений Di-Pl симплектитов в монокристаллах омфацита и центральной части граната, а также наличием двух генераций метаморфических цирконов 2,7 и 1,9 млрд лет [Volodichev et al., 2021]. Оценить P-T условия метаморфизма данного этапа возможно только по включениям Di+Pl+Hbl(+Qz) в гранатах Самылино:  $T = 700\text{--}760\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P = 12\text{--}14,5$  кбар.

Поздняя генерация Grt+Omp минерального парагенезиса и включений Omp в промежуточной части граната в эклогитах-II образовалась при  $T = 700\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P = 14\text{--}17$  кбар. Этому этапу метаморфизма соответствует циркон с возрастом 1,9 млрд лет, содержащий включения граната и омфацита [Yu et al., 2017].

Последующие стадии метаморфизма связаны с ретроградными изменениями эклогитов в условиях высокобарной гранулитовой ( $T = 750\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 12\text{--}15$  кбар) и амфиболитовой ( $T = 600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 8\text{--}11$  кбар) фации.

В результате термобарометрических расчетов и их сопоставления с данными U-Th-Pb дати-



P-T-t метаморфические тренды преобразования эклогитов Гридинского комплекса на P-T диаграмме

P-T-t metamorphic transformation trends of eclogites of the Gridino complex on the P-T diagram

рования цирконов получен сложный P-T-t тренд метаморфических преобразований эклогитов Столбихи и Самылино (рис.). Он состоит из двух ретроградных ветвей для эклогитов-I и эклогитов-II, которые отражают декомпрессионные изменения пород в условиях высокобарной гранулитовой и амфиболитовой фации. Тренды характеризуются движением по часовой стрелке, что типично для орогенного (коллизийного) и субдукционного метаморфизма [Лиханов, 2020].

## Литература

Володичев О. И., Слабунов А. И., Бибикова Е. В., Конилов А. Н., Кузенко Т. И. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология. 2004. Т. 12, № 6. С. 609–631.

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

Максимов О. А., Балаганский В. В., Слабунов А. И., Ларионов А. Н. Два этапа высокобарного метаморфизма в раннедокембрийских эклогитах (рай-

он Гридино Беломорской провинции Фенноскандинавского щита): петрология и геохронология // Петрология. 2022. № 2. С. 140–165. doi: 10.31857/S0869590322020042

Слабунов А. И., Балаганский В. В., Щипанский А. А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 648–675. doi: 10.15372/GiG2021116

Mints M. V., Belousova E. A., Konilov A. N., Natapov L. M., Shchipansky A. A., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Dokukina K. A., Kaulina T. V. Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia // Geol. 2010. Vol. 38. P. 739–742. doi: 10.1130/G31219.1. 70

Yu H. L., Zhang L. F., Wei C. J., Li X. L., Guo J. H. Age and P-T conditions of the Gridino eclogite in the Belomorian Province, Russia // J. Metamorp. Geol. 2017. Vol. 35. P. 855–869. doi: 10.1111/jmg.12258

Volodichev O. I., Maksimov O. A., Kuzenko T. I., Slabunov A. I. Archean zircons with omphacite inclusions from eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: The first finding // Minerals. 2021. Vol. 11. Art. 1029. doi: 10.3390/min11101029

Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *Amer. Mineral.* 2010. Vol. 95. P. 185–187. doi: 10.2138/am.2010.3371

## References

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 (In Russ.)

Maksimov O. A., Balagansky V. V., Slabunov A. I., Larionov A. N. Two high-pressure metamorphic events in the Early Precambrian eclogites of the Gridino Area (Belomorian Province of the Fennoscandian Shield): Petrology and geochronology. *Petrology.* 2022;2:140–165. doi: 10.31857/S0869590322020042 (In Russ.)

Mints M. V., Belousova E. A., Konilov A. N., Natapov L. M., Shchipansky A. A., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Dokukina K. A., Kaulina T. V. Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia. *Geol.* 2010;38:739–742. doi: 10.1130/G31219.1.70

Slabunov A. I., Balagansky V. V., Shchipansky A. A. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield, and the tectonic setting of eclogites. *Russian Geology and Geophysics.* 2021;62(5):525–546. doi: 10.2113/RGG20204266 (In Russ.)

Volodichev O. I., Maksimov O. A., Kuzenko T. I., Slabunov A. I. Archean zircons with omphacite inclusions from eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: The first finding. *Minerals.* 2021;11:1029. doi: 10.3390/min11101029

Volodichev O. I., Slabunov A. I., Kuzenko T. I., Bibikova E. V., Konilov A. N. Archean eclogites in the Belomorian Mobile Belt, Baltic Shield. *Petrology.* 2004;12(6):540–560. (In Russ.)

Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Mineral.* 2010;95:185–187. doi: 10.2138/am.2010.3371

Yu H. L., Zhang L. F., Wei C. J., Li X. L., Guo J. H. Age and P-T conditions of the Gridino eclogite in the Belomorian Province, Russia. *J. Metamorp. Geol.* 2017;35:855–869. doi: 10.1111/jmg.12258

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Максимов Олег Александрович

научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: olemaximov@mail.ru

## CONTRIBUTOR:

### Maksimov, Oleg

Researcher, Precambrian Geology and Geodynamics Laboratory

УДК 553.3:551.71/.72

## ЖЕЛЕЗОРУДНЫЕ ФОРМАЦИИ ДОКЕМБРИЯ: ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ И ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

**П. В. Медведев**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

Древнейшие железорудные образования – богатые железом и кремнеземом хемогенные осадочные породы докембрийского возраста содержат информацию об экологических условиях в архейском (4,0–2,5 млрд лет назад) и протерозойском (2,5–0,539 млрд лет назад) зонах. Несмотря на разногласия относительно механизмов их образования, железорудные формации являются свидетельством влияния докембрийской биосферы на химический состав древнего океана. Поскольку многие железорудные образования представляют собой хемогенные осадки, отражающие состав вод бассейна, они могут служить подробными геохимическими архивами для реконструкции температуры древних морей, окислительно-восстановительных условий и круговорота химических элементов.

Ключевые слова: архей; протерозой; железорудные формации; условия образования; микроорганизмы

Для цитирования: Медведев П. В. Железорудные формации докембрия: палеоэкологический и палеонтологический аспекты // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 95–98. doi: 10.17076/geo1676

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-17-00026 по проекту «Геодинамические обстановки ранней Земли и архейские полосчатые железистые кварциты».

### **P. V. Medvedev. PRECAMBRIAN IRON FORMATIONS: PALEOECOLOGICAL AND PALEONTOLOGICAL ASPECTS**

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

Ancient iron formations – Precambrian chemogenic sedimentary rocks rich in iron and silica contain information about environmental conditions in the Archean (4.0–2.5 Ga) and Proterozoic (2.5–0.539 Ga) eons. Despite disagreements about the mechanisms of their genesis, iron formations are evidence of the influence of the Precambrian biosphere on the chemical composition of the ancient ocean. Since many iron ore formations are chemogenic deposits reflecting the composition of the waters from which they had precipitated, they can also serve as detailed geochemical archives for studying the temperature of ancient seas, redox states and the cycle of chemical elements.

Keywords: Archean; Proterozoic; iron formations; depositional environments; microorganisms

For citation: Medvedev P. V. Precambrian iron formations: paleoecological and paleontological aspects. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:95–98. doi: 10.17076/geo1676

Funding. The study was funded by Russian Science Foundation grant # 22-17-00026 for the project “Early-Earth geodynamic environments and Archean banded iron formations”.

Железорудные формации (ЖФ) представляют собой богатый железом тип горных пород, который характерен для многих архейских и протерозойских супракрустальных толщ и является химическим архивом состава докембрийской морской воды и круговорота железа после осаждения. Учитывая, что они накапливались на морском дне в течение более двух миллиардов лет ранней истории Земли, перемены в химическом, минеральном и изотопном составе ЖФ дают уникальную возможность проследить за изменениями окружающей среды на эволюционирующей Земле. Возможно, одним из наиболее значимых событий стал переход от бескислородной планеты к планете, где кислород постоянно присутствовал в толще морской воды и атмосфере. С этим постепенным глобальным насыщением кислородом была связана эволюция аэробного микробного метаболизма, который фундаментально повлиял на процессы континентального выветривания, поступление питательных веществ в океаны и, в конечном счете, диверсификацию биосферы и возникновение сложных форм жизни. Многие из ключевых современных открытий в понимании генезиса ЖФ связаны с геобиологией, поскольку биологически поддерживаемое окисление двухвалентного железа ( $Fe^{2+}$ ) либо напрямую посредством фотоферротрофии, либо косвенно посредством кислородного фотосинтеза обеспечивает процесс осаждения ЖФ. Обилие и изотопный состав минералов, содержащих  $Fe^{2+}$ , в ЖФ предполагают восстановление трехвалентного железа ( $Fe^{3+}$ ) микроорганизмами (археями и бактериями). Связи между геобиологией, гидротермальными системами и образованием ЖФ традиционно игнорировались, но теперь формируют согласованную модель для этого уникального типа горных пород [Mänd et al., 2022].

Железорудные формации – это богатые железом (15–40 мас. % Fe) и кремнистые (40–60 мас. %  $SiO_2$ ) хемогенные осадочные породы, которые выпадали в осадок из морской воды на протяжении докембрийского времени

в интервале между 2,80 и 1,85 млрд лет назад (неоархей и палеопротерозой). На минимальное поступление детрита при отложении глубоководных ЖФ указывают низкие концентрации  $Al_2O_3$  (<1 мас. %) и микроэлементов, которыми обогащены породы земной коры (Ti, Zr, Th, Hf и Sc < 20 промилле) [Konhauser et al., 2017]. Большинство ЖФ демонстрируют характерную полосчатость переменной толщины, от макрополос (толщиной в метр) до мезополос (толщиной в сантиметр) и микрополос (миллиметровой и субмиллиметровой толщины), по которым определяются полосчатые железорудные формации (BIF). Микрополосы связаны с эпизодическим гидротермальным воздействием, которое, как предполагалось ранее, представляет собой годовой процесс осаждения. Полосчатость в BIF может быть обширной по площади, указывающей на отложение ниже уровня волн. Некоторые ЖФ, известные как гранулированные железные формации (GIF), лишены этой характерной полосчатости и состоят из гранул кремнезема и оксидов или силикатов железа с раннедиагенетическим кремнистым, карбонатным или гематитовым цементом, заполняющим поровое пространство [Bekker, Kovalick, 2021]. Обычно считается, что GIF осаждались вблизи берега на мелководье. ЖФ всех типов могут предоставить важную информацию о составе вод древних океанов, но только в том случае, если можно разделить физическую и химическую среду отложения, тектоническую обстановку бассейна, первичные и вторичные геохимические сигналы.

ЖФ в широком смысле делятся на два типа – Алгома и Сьюпериор, в зависимости от условий осаждения, хотя логичнее рассматривать эти типы как крайние члены, имеющие спектр промежуточных разновидностей [Bekker et al., 2014]. ЖФ типа Алгома переслаиваются или стратиграфически и генетически связаны с подводными мафит-ультрамафитовыми и фельзитовыми вулканическими породами, вулканокластическими граувакками и сланцами в зеленокаменных поясах, а во многих случаях



пространственно приурочены к вулканогенным месторождениям массивных сульфидных руд [Bekker et al., 2014]. ЖФ типа Алгома, по-видимому, образовались вблизи вулканических дуг и центров спрединга в результате эксгальационных гидротермальных процессов, связанных с подводным вулканизмом. Они содержат оксидную, силикатную и карбонатную фации и обычно классифицируются как сульфидные отложения, которые могут быть обогащены медью, цинком, свинцом, серебром и золотом. Отсутствие каких-либо седиментологических особенностей, кроме тонкой полосчатости (т. е. отсутствие осадочных текстур, генерируемых течением, приливом или волной) в ЖФ типа Алгома указывает на глубоководную среду осадконакопления, вероятно, удаленную от континентальных массивов суши. В этом отношении ЖФ типа Алгома имеют составы, которые отражают влияние местных гидротермальных флюидов в частично закрытых бассейнах или в открытоморских системах [Konhauser et al., 2017]. ЖФ, которые выпали в осадок ранее 3,0 млрд лет назад, обычно описываются как алгомского типа, хотя есть и более поздние примеры возрастом 2,7–2,6 млрд лет, а также неалгомские мелководноморские ЖФ толщи в палеоархее. Крупнейшее железорудное месторождение Карелии – Костомукшское, приуроченное к одноименному зеленокаменному поясу, относится к типу Алгома. Недавние геохронологические исследования показали, что осадконакопление железосодержащих толщ происходило одновременно с кислым вулканизмом в интервале 2759–2743 млн лет в субдукционной геодинамической обстановке [Слабунов и др., 2021, 2022].

Напротив, ЖФ типа Сьюпериор развивались в условиях пассивной окраины с преобладанием осадконакопления (т. е. после образования стабильных континентальных шельфов) и, как правило, не имеют прямых стратиграфических связей с вулканическими породами. Считается, что эти ЖФ формировались в прибрежных шельфовых средах, поскольку обычно переслаиваются с карбонатами и черными сланцами. В отличие от большинства ЖФ типа Алгома, которые редко прослеживаются более чем на 10 км по простиранию и обычно имеют мощность не более 50 м, ЖФ типа Сьюпериор могут иметь первоначальную площадь осадконакопления, превышающую 100 000 км<sup>2</sup> [Bekker et al., 2014]. С точки зрения запасов самые крупные ЖФ типа Сьюпериор содержат более 10<sup>14</sup> тонн железа [Konhauser et al., 2017], обеспечивая большую часть железа, необходимого для мировой экономики. Например,

бассейны Хамерсли в Австралии, Минас-Жерайс в Бразилии, Трансваальский в Южной Африке, Кривой Рог (Украина) и Лабрадорский трог (Канада).

BIF доминируют в эоархейских и раннепалеопротерозойских последовательностях и состоят из перемежающихся полос, богатых железом и кремнеземом. BIF осаждались в относительно глубоководных условиях, поскольку в них обычно отсутствуют свидетельства воздействия волн или штормов. Большинство BIF обычно перекрываются или подстилаются богатыми органическим веществом и сульфидами сланцами, а в некоторых случаях переслаиваются с ними.

GIF впервые появляются в геологической летописи около 2,90 млрд лет назад [Konhauser et al., 2017], достигают своего пика около 1,88 млрд лет назад, сменяясь железняками в фанерозойской летописи (после 543 млн лет назад) [Bekker et al., 2014]. GIF характеризуются наличием гранул, которые могут различаться по морфологии, размеру (от микрометров до сантиметров в диаметре) и составу (кремнезем, оксиды железа, карбонаты железа и/или силикаты железа); цемент обычно представляет собой кремнезем, карбонат или гематит. Многие из гранул рассматриваются как обломочные, причем некоторые из них получены в результате разрушения богатых железом глин, аргиллитов, аренигов и строматолитов. Другой генезис имеют, например, оолитовые породы свиты Тимболл Хилл в Южной Африке (2,32 млрд лет), состоящие из концентрических корковых отложений гематита, которые, вероятно, осаждались на малой глубине, где богатые Fe<sup>2+</sup> воды встречались с более насыщенной кислородом морской водой. В породе могут преобладать как гранулы, так и цемент. Наличие осадочных текстур, образованных волнами и течением, например, косои слоистости, указывает на то, что гранулы образовались у берега на глубине, близкой к основанию волн.

Выяснение генезиса ЖФ продвинулось быстрыми темпами в последние годы, поскольку эти характерные хемогенные отложения активно используются в качестве палеоокеанографических архивов. Одним из достижений является понимание коэволюции процессов на поверхности Земли с микробным метаболизмом во время архейско-протерозойского перехода. Геологическая летопись ЖФ помогла понять эволюцию аэробного метаболизма, связанного с более ранней экспансией цианобактерий по всей поверхности океанов во время перехода от архея к протерозою.

## Литература

Слабунов А. И., Кервинен А. В., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Максимов О. А., Медведев П. В. Полихронная история формирования полосчатых железистых кварцитов главной рудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса: возраст цирконов и акцессорные минералы // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 139–143. doi: 10.17076/geo1666

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Кулешевич Л. В., Кевлич В. И. Геохимия, геохронология цирконов и возраст архейской железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита // Геохимия. 2021. Т. 66(4). Р. 291–307. doi: 10.31857/S0016752521040063

Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations // Alderton D., Elias S. A., eds. *Encyclopedia of Geology* (2nd ed.), Oxford: Academic Press, 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00199-5

Bekker A., Planavsky N. J., Rasmussen B., Krapež B., Hofmann A., Slack J., Rouxel O., Konhauser K. Iron formations: Their origins and implications for ancient seawater chemistry // Holland H. D., Turekian K. K., eds., *Treatise on Geochemistry* (2nd ed.), Oxford: Elsevier, 2014. P. 561–628. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00719-1

Konhauser K. O., Planavsky N. J., Hardisty D. S., Robbins L. J., Warchola T. J., Haugaard R., Lalonde S. V., Partin C. A., Oonk P. B. H., Tsikos H., Lyons T. W., Bekker A., Johnson C. M. Iron formations: A global record of Neoproterozoic to Palaeoproterozoic environmental history // *Earth-Science Rev.* 2017. Vol. 172. P. 140–177. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Mänd K., Robbins L., Planavsky N., Bekker A., Konhauser K. Iron formations as Palaeoenvironmental archives (elements in geochemical tracers in Earth System Science). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 44 p. doi: 10.1017/9781108993791

## References

Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations. Alderton D., Elias S. A., eds. *Encyclopedia of Geology* (2nd ed.), Oxford: Academic Press; 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00199-5

Bekker A., Planavsky N. J., Rasmussen B., Krapež B., Hofmann A., Slack J., Rouxel O., Konhauser K. Iron formations: Their origins and implications for ancient seawater chemistry. Holland H. D., Turekian K. K., eds. *Treatise on Geochemistry* (2nd ed.), Oxford: Elsevier; 2014. P. 561–628. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00719-1

Konhauser K. O., Planavsky N. J., Hardisty D. S., Robbins L. J., Warchola T. J., Haugaard R., Lalonde S. V., Partin C. A., Oonk P. B. H., Tsikos H., Lyons T. W., Bekker A., Johnson C. M. Iron formations: A global record of Neoproterozoic to Palaeoproterozoic environmental history. *Earth-Science Rev.* 2017;172:140–177. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Mänd K., Robbins L., Planavsky N., Bekker A., Konhauser K. Iron formations as Palaeoenvironmental archives (elements in geochemical tracers in Earth System Science). Cambridge: Cambridge University Press; 2022. 44 p. doi: 10.1017/9781108993791

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Egorov A. V., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Polychronous evolution of Neoproterozoic banded iron formation in the main ore sequence of the Kostomuksha greenstone belt: the age of zircons and accessory minerals. *Trudy Karelianskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2022;5:139–143. doi: 10.17076/geo1666

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Egorov A. V., Kuleshevich L. V., Kevlich V. I. Age of the Archean strata with banded iron formation in the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield: Constraints on the geochemistry and geochronology of zircons. *Geochem. Int.* 2021;59(4):341–356. doi: 10.1134/S0016702921040066

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Медведев Павел Владимирович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: pmedved@krc.karelia.ru

## CONTRIBUTOR:

**Medvedev, Pavel**

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

УДК 551.71/.72

## ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКАЯ СТРУКТУРА ВЕТРЕННЫЙ ПОЯС: НЕРЕШЕННЫЕ ВОПРОСЫ

С. В. Межеловская<sup>1\*</sup>, А. Д. Межеловский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт РАН (пер. Пыжевский, 7, Москва, Россия, 119017),  
\*Mezhelsofya@gmail.com

<sup>2</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе  
(ул. Миклухо-Маклая, 23, Москва, Россия, 117997)

В раннем протерозое на территории Балтийского щита в результате деструкции континентальной коры заложился рифт Ветренный пояс. Проведенные исследования его осадочно-вулканогенного комплекса позволили установить, что пояс сформировался на коре континентального типа в пределах Карельского кратона. Осадки и вулканиды формировались во внутриплитной прибрежно-морской обстановке. Реконструкция источников сноса для формирования обломочного материала указывает на континентальные условия на всем протяжении становления структуры. Однако сопоставление разреза Ветренного пояса с аналогичными прогибами Балтийского щита все еще позволяет усомниться в принятой стратиграфической последовательности.

Ключевые слова: Балтийский щит; петрографическое и изотопно-геохронологическое изучение; стратиграфия; корреляция

Для цитирования: Межеловская С. В., Межеловский А. Д. Палеопротерозойская структура Ветренный пояс: нерешенные вопросы // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 99–102. doi: 10.17076/geo1694

## S. V. Mezhelovskaya<sup>1\*</sup>, A. D. Mezhelovskiy<sup>2</sup>. WINDY BELT PALEOPROTEROZOIC STRUCTURE: UNRESOLVED ISSUES

<sup>1</sup> Geological Institute, Russian Academy of Sciences (7 Pyzhevsky Pereulok, Moscow, Russia),  
\*Mezhelsofya@gmail.com

<sup>2</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting  
(23 Miklukho-Maklai St., 117997 Moscow, Russia)

The Windy Belt rift was formed in the Baltic Shield in the Early Proterozoic as a result of continental crust destruction. Investigations of its sedimentary-volcanogenic complex have shown that the belt was formed on continental crust within the Karelian craton. Sediments and volcanics were formed in an intraplate coastal-marine environment. Reconstruction of clastic sediment formation sources is suggestive of continental conditions throughout. However, comparison of the Windy Belt cross-section with analogous depressions of the Baltic Shield still makes us question the commonly accepted stratigraphic sequence.

Keywords: Baltic Shield; petrographic and isotope-geochronological studies; stratigraphy; correlation

For citation: Mezhelevskaya S. V., Mezhelevskiy A. D. Windy Belt paleoproterozoic structure: unresolved issues. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:99–102. doi: 10.17076/geo1694

Раннепротерозойская структура Ветреный пояс, расположенная на юго-востоке Карельского кратона, является пограничной между Беломорским подвижным поясом и Карельской гранит-зеленокаменной областью. Пояс образован чередованием осадочных и вулканогенных толщ, преобразованных в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма и погружающихся под углами 20–40° в северо-восточном направлении. Долгое время разрез Ветреного пояса являлся аналогом других палеопротерозойских структур. По мнению ряда исследователей [Богданов и др., 2011], различные комплексы пояса были отнесены к сумийскому, ятулийскому и людиковийскому надгоризонтам палеопротерозоя, в том числе и по данным Госгеолкарты [Государственная..., 2001]. Комплекс Ветреного пояса успешно коррелировался со стратотипическими разрезами, например, Онежской структуры, пока не были получены датировки по вулканитам, завершающим разрез Ветреного пояса. На сегодняшний день есть несколько изотопных датировок для коматиитовых базальтов, завершающих разрез Ветреного пояса: U-Pb (2405 ± 5 млн лет) [Межеловская и др., 2016], Re-Os (2407 ± 6 млн лет) [Puchtel et al., 2016] и Sm-Nd (2410 ± 34 млн лет) [Puchtel et al., 1997]. Изучение осадочно-вулканогенного комплекса позволило вновь поставить под сомнение принятую стратиграфическую последовательность Ветреного пояса.

В основании разреза на размытой поверхности архейских плагиогранитоидов залегает токшинская свита. Основу разреза составляют светло-серые рассланцованные кварциты. Основным минералом является кварц – до 98 %, в подчиненном количестве находятся мусковит, серицит и фуксит. Мощность свиты достигает 1500 м. Петрогеохимические данные позволяют сделать вывод о том, что породы свиты представляют собой продукты неоднократного цикла седиментации и накапливались в прибрежно-морской обстановке. Выше залегает вулканогенная киричская свита, граница с подстилающими образованиями проводится по появлению в разрезе первого горизонта лав андезибазальтового состава. В строении лавовых потоков

встречаются миндалекаменные базальты, лавобрекчии, агломераты и туфы, иногда наблюдаются прослойки туфоконгломератов. Основная масса представлена новообразованными амфиболами и измененными полевыми шпатами. Породы свиты как слагают обширные лавовые поля, так и формируют отдельные вулканотектонические структуры центрального типа. Мощность свиты 700–1100 м. Породы калгачинской свиты представлены конгломератами, в составе обломков резко преобладают гранитоиды, цемент кварцево-слюдистый с хлоритом. Форма и размер галек меняются по разрезу: внизу обломки имеют уплощенную продолговатую форму (соотношение длины и ширины от 2 до 5, размер 2–3 см); вверх по разрезу размер увеличивается до 7–10 см, а форма приближается к сферической (соотношение длины к ширине от 1,5 до 2). Такое обстоятельство может указывать на смену обстановки седиментации с континентальной (русловой) на прибрежно-морскую. Установленная мощность свиты не менее 100 м. Выше залегает кожозерская свита, обладающая пестрым составом. Базальные пачки сложены чередованием песчаников и туффитов. Для средней части разреза типично переслаивание карбонатов, туффитов с потоками базальтов, трахибазальтов. В верхах разреза наблюдаются светлые и темные слоистые доломиты и аркозовые кварцитопесчаники. По зеленым сланцам развита биотитизация, в карбонатах присутствует терригенная примесь кварца и полевых шпатов. В аркозовых кварцитопесчаниках развиты кварц, полевые шпаты, серицит, микроклин и эпидот. Наличие хорошо сохранившихся неокатанных минералов, а иногда и мелких обломков пород кислого состава указывает на низкую степень зрелости пород и близко расположенный источник сноса. Мощность свиты колеблется от 400 до 600 м. Виленгская свита в нижней части разреза сложена темно-серыми песчаниками, алевролитами и пелитами с прослоями туффитов. Темный цвет пород обусловлен преобладанием темноцветных минералов (преобладает пироксен), а в ряде случаев – присутствием углеродистого вещества. В верхней части разреза появляются олигомиктовые кварцитопесчаники, основными минералами в них являются кварц,

серицит и полевые шпаты. Мощность 1200–1500 м. Завершает разрез свита Ветреного пояса, сложенная многочисленными потоками коматиитовых базальтов и туфов. Потоки часто дифференцированы и подразделяются на кумулятивные зоны, а также зоны с микроструктурой спинифекс оливинового или пироксенового типов. В обнажениях часто наблюдаются миндалекаменные базальты, лавобрекчии и подушечные лавы. Мощность свиты, по геофизическим данным, достигает 4000 м.

На гистограммах распределения возрастов детритовых цирконов с графиками плотности вероятности для всех осадочных уровней Ветреного пояса наблюдаются палео-, мезо- и неоархейские пики 2,7–2,8–2,9 млрд лет, которые отвечают времени становления основных структурно-вещественных комплексов Карельской гранит-зеленокаменной области. Самые древние зерна имеют возраст 3,1–3,3 млрд лет, а самые молодые в кожозерской и виленгской свите – 2464–2494 млн лет и фиксируют нижний предел осадконакопления. На основе комплексного изучения циркона реконструированы возможные источники сноса при формировании осадков Ветреного пояса. Ими были различные вещественные комплексы Сумозерско-Кенозерского пояса, гранитоиды Шилосского типа, ТТГ-комплексы Водлозерского блока и поздние гранитоиды Каменноозерской структуры. Процесс накопления осадочных толщ Ветреного пояса происходил в спокойной мелководной прибрежно-морской обстановке в континентальных условиях, что подтверждается геохимическими данными.

Таким образом, сводный разрез Ветреного пояса отличается от сумийских прогибов Балтийского щита присутствием в середине разреза карбонатов с прослоями высокомагнезиальных базальтов, трахибазальтов и углеродсодержащих осадков, а также полным отсутствием кислых производных вулканизма. В то же время многие особенности последовательности и состава пород разреза Ветреного пояса сближают его с более молодыми, ятулийским и людиковийским, надгоризонтами палеопротерозойских структур на Карельском кратоне. Выяснение причин такой специфики Ветреного пояса требует дополнительных исследований.

## Литература

Богданов Ю. Б., Робонен В. И. Результаты деятельности региональной межведомственной

стратиграфической комиссии по Северо-Западу России (1984–2010) // Геология Карелии от архея до наших дней / ИГ КарНЦ РАН; ВСЕГЕИ, 2011. С. 65.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Сер. Карельская. Листы Р-37-I, Р-37-VII. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2001. 94 с. + 1 вкл. (МПР РФ, ПГО «Архангельскгеология»).

Межеловская С. В., Корсаков А. К., Межеловский А. Д., Бибикина Е. В. Временной диапазон формирования осадочно-вулканогенного комплекса Ветреного пояса // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2016. Т. 24, № 2. С. 1–14. doi: 10.7868/S0869592X16020046

Puchtel I. S., Haase K. M., Hofmann A. W., Chauvel C., Kulikov V. S., Garbe-Schönberg C.-D., Nemchin A. A. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the Vetreny Belt, southeastern Baltic Shield Evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. Vol. 61. P. 1205–1222.

Puchtel I. S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R. J., Brandon A. D., Nicklas R. W., Kulikov V. S., Samsonov A. V. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean-Proterozoic boundary: Evidence from 2.4 Ga komatiites // Geochim. Cosmochim. Acta. 2016. Vol. 180. P. 227–255. doi: 10.1016/j.gca.2016.02.027

## References

Bogdanov Yu. B., Robonen V. I. Results of the activities of the regional stratigraphic commission for Northwest Russia (1984–2010). *Geologiya Karelii ot arkheya do nashikh dnei = Geology of Karelia from the Archean to the present day*. 2011. P. 65. (In Russ.)

Mezhelevskaya S. V., Korsakov A. K., Mezhelevskii A. D., Bibikova E. V. Time span of formation of the Vetrenyi Belt sedimentary-volcanogenic complex. *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya = Stratigraphy. Geological Correlation*. 2016;24(2):1–14. doi: 10.7868/S0869592X16020046 (In Russ.)

Puchtel I. S., Haase K. M., Hofmann A. W., Chauvel C., Kulikov V. S., Garbe-Schönberg C.-D., Nemchin A. A. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the Vetreny Belt, southeastern Baltic Shield Evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997;61:1205–1222.

Puchtel I. S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R. J., Brandon A. D., Nicklas R. W., Kulikov V. S., Samsonov A. V. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean-Proterozoic boundary: Evidence from 2.4 Ga komatiites. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2016;180:227–255. doi: 10.1016/j.gca.2016.02.027

State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Karelian. Ser. Sheets P-37-I, P-37-VII. The explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI; 2001. 94 p. + 1 inset. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 14.07.2022; принята к публикации / accepted: 24.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:****Межеловская Софья Владимировна**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: Mezhelsofya@gmail.com*

**Межеловский Алексей Дмитриевич**

канд. геол.-мин. наук, доцент

*e-mail: Geocon@yandex.ru*

**CONTRIBUTORS:****Mezhelovskaya, Sofya**

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

**Mezhelovskiy, Alexey**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor

УДК 551.71:552.313+550.4:551.2 (470.22)

## КИЧАНСКАЯ ОСТРОВОДУЖНАЯ СИСТЕМА АРХЕЯ (НОВЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНО- ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА)

Т. А. Мыскова<sup>1\*</sup>, А. С. Никонова<sup>2</sup>, К. А. Никонов<sup>2</sup>,  
И. А. Житникова<sup>2</sup>, П. А. Львов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034), \* [tmyskova@gmail.com](mailto:tmyskova@gmail.com)

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (Средний проспект В.О., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106)

Предложена обновленная схема стратификации зеленокаменных образований Кичанской структуры. Определены возрасты (U-Pb по циркону) кристаллизации и метаморфизма вулканитов. Установлена последовательность формирования выделенных толщ и продолжительность геодинамических режимов.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит; архей; U-Pb возраст; геодинамические обстановки

Для цитирования: Мыскова Т. А., Никонова А. С., Никонов К. А., Житникова И. А., Львов П. А. Кичанская островодужная система архея (новые геохимические и изотопно-геохронологические доказательства) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 103–106. doi: 10.17076/geo1688

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы НИР № FMUW-2022-0004.

## T. A. Myskova<sup>1\*</sup>, A. S. Nikonova<sup>2</sup>, K. A. Nikonov<sup>2</sup>, I. A. Zhitnikova<sup>2</sup>, P. A. Lvov<sup>1,2</sup>. THE KICHAN ARCHEAN ISLAND-ARC SYSTEM (NEW GEOCHEMICAL AND ISOTOPE GEOCHRONOLOGY EVIDENCE)

<sup>1</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia), \* [tmyskova@gmail.com](mailto:tmyskova@gmail.com)

<sup>2</sup> A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (74 Sredniy Ave., 199106 St. Petersburg, Russia)

An updated stratification scheme is proposed for greenstone formations of the Kichanskaya structure. The ages (zircon U-Pb) of volcanic rock crystallization and metamorphism were estimated. The formation sequence of the identified strata and the duration of geodynamic regimes were determined.

Keywords: Fennoscandian shield; Archaean; U-Pb age; geodynamic settings

Кичанская структура представляет собой фрагмент Тикшозерского зеленокаменного пояса, расположенный в его северной части. Установлено, что зеленокаменные образования по геохимическим характеристикам сходны с вулканогенными ассоциациями кайнозойских островных дуг [Милюкевич и др., 2003; Слабунов, 2008]. Породы хорошо охарактеризованы геохимически, но нет единого мнения в отношении их стратиграфического расчленения при явном дефиците геохронологических данных. Полученные новые данные по возрасту и составу пород позволили подкорректировать имеющиеся стратиграфические схемы и установить продолжительность существования ранее выделенных геодинамических режимов. Архейские супракрустальные образования разделены нами на три толщи. Разрез наращивается с северо-востока на юго-запад. Породы имеют преобладающие северо-западные простирания и крутые падения, в большинстве случаев на юго-запад, реже на северо-восток.

*Нижняя толща* ( $m = 2000$  м) развита на северо-востоке и представлена метаморфизованной в условиях амфиболитовой фации бимодальной серией в виде чередования пачек (мощностью 200–400 м) амфиболитов и гнейсов с небольшим преобладанием первых.

По химическому составу амфиболиты отвечают базальтам и андезибазальтам умеренной щелочности, принадлежат толеитовой серии. Характеризуются горизонтальными спектрами распределения РЗЭ и отсутствием отрицательных Nb-аномалий, что роднит их с вулканитами MORB кайнозойских геодинамических обстановок. На дискриминационной диаграмме  $Zr/Y-Nb/Y$  фигуративные точки пород попадают в поле базальтов океанических плато, имеющих плюмовый источник, и сосредоточены вблизи состава примитивной мантии. Такие геохимические особенности основных вулканитов свидетельствуют в пользу их океанической природы.

Гнейсы имеют переменный минеральный состав (Bt, Grt-Bt, Ky-Grt-Bt и Grt-Bt-Amp) и отвечают дацитам и риолитам нормальной щелочности (лавам и туфам) с натриевой специализацией. Метариолиты относятся к толеитовой серии и являются железистыми, а дациты –

к известково-щелочной с магнезиальным характером. Обе группы высокоглиноземистые. Им свойственны слабодифференцированные спектры распределения для легких лантаноидов ( $La_N/Sm_N = 2-5$ ) и горизонтальные – для тяжелых с отчетливыми Eu-аномалиями ( $Eu^*/Eu = 0,6$ ) у риолитов. На спайдерграммах обе группы демонстрируют Nb-минимумы, характерные для пород надсубдукционных обстановок. На тектонических дискриминационных диаграммах Y-Nb и Yb-Ta их составы занимают неоднозначное положение, попадая в поля как внутриплитных обстановок, так и островных дуг.

Возраст кристаллизации метариолита из средней части разреза составляет  $2788 \pm 4$  млн лет. Sm-Nd модельный возраст отвечает 2,89 млрд лет,  $\epsilon Nd = 2,59$ , что предполагает ювенильный источник лав. Возраст кристаллизации метаандезибазальта из верхов толщи –  $2765 \pm 4$  млн лет. Его модельный Sm-Nd возраст 2,86 млрд лет и  $\epsilon Nd = 2,92$  свидетельствуют в пользу мантийной природы.

*Средняя толща* ( $m = 1500$  м) представлена Grt- и Pl-амфиболитами. По геохимическим характеристикам они являются аналогами метабазальтов первой толщи, но слабо обогащены Rb и Ba, что позволяет предположить в первичных расплавах присутствие субдукционного компонента. Как и основные вулканиты первой толщи, метабазальты второй толщи, скорее всего, являются продуктами глубинного плавления мантийного субстрата и сформированы в рифтогенных обстановках.

*Верхняя толща* ( $m = 2500$  м) представлена гнейсами пестрого минерального состава с вариациями содержания темноцветных минералов (Bt, Amp, Grt, Ms и редко Px). Амфиболиты встречаются только в виде редких маломощных полос. Гнейсы представляют собой метаморфизованные средние и кислые вулканиты, амфиболиты отвечают субщелочным базальтам. В разрезах часто наблюдаются полосчатые текстуры, а в верхах толщи – реликты кривой слоистости, что свидетельствует о присутствии среди лав туфогенных пачек. Метавулканиты отличаются высоким содержанием  $Al_2O_3$  (16–20 мас. %), Sr (500–900 мкг/г), Ba (600–800 мкг/г), низкими концентрациями Y, Yb, Nb и



высокими Sr/Y отношениями (30–120), что роднит их с кайнозойскими адакитами. Породы принадлежат преимущественно к известково-щелочной серии нормальной щелочности, но часть проб попадает в поле толеитовой серии. Вулканы имеют натриевую специализацию, высокоглиноземистый характер и относятся как к магнезиальным, так и к железистым разностям. Все они характеризуются схожими дифференцированными спектрами распределения РЗЭ ( $La_N/Lu_N = 10-20$ ), в ряде случаев с существенным обеднением тяжелыми лантаноидами ( $La_N/Lu_N$  до 33–40), без заметных европиевых аномалий. Такие спектры характерны для вулканитов современных островных дуг. Островодужная природа подтверждается также наличием отчетливых аномалий Nb и Ti и близостью к составам вулканитов островных дуг на дискриминационных диаграммах Y–Nb и Yb–Ta. Получены три возрастные датировки (U–Pb по циркону), демонстрирующие омоложение вулканической деятельности с северо-востока на юго-запад.

Метадацит из восточной части разреза имеет U–Pb по циркону возраст  $2741 \pm 6$  млн лет. Sm–Nd модельный возраст составляет 2,84 млрд лет,  $Nd = 2,67$ , что позволяет говорить о ювенильной природе первичного расплава. Для туфа дацита из средней части разреза получен возраст  $2734 \pm 7$  млн лет. Его модельный Sm–Nd возраст 3 млрд лет и  $\epsilon Nd = 0,4$  указывают на коровый источник. Возраст кристаллизации циркона из метадацита западной части структуры отвечает  $2716 \pm 7$  млн лет. Sm–Nd модельный возраст равен 2,89 млрд лет,  $\epsilon Nd = 1,73$ , что свидетельствует о смешанной мантийно-коровой природе лав. Как видно, вулканиты верхней толщи обязаны своим происхождением разным источникам. Наиболее ранние выплавлены из мантийного субстрата. Более поздние возникли путем парциального плавления субдуцирующей базальтовой океанической коры или явились результатом мантийно-корового взаимодействия.

Таким образом, присутствие в нижней толще единой ассоциации океанических базальтов и кислых вулканитов с геохимическими чертами

островодужных пород знаменует собой переходный геодинамический режим от островной дуги к континентальному рифту. Продолжительность этого этапа составляет чуть более 20 млн лет (от 2788 до 2765 млн лет). Излияния метабазальтов средней толщи связаны с более продвинутой стадией рифтообразования (скорее в задуговом бассейне, чем в зоне срединно-океанического спрединга). Формирование средних и кислых вулканитов верхней толщи близко по продолжительности к первому этапу (25 млн лет) и происходило в период 2741–2716 млн лет уже в условиях островной дуги, возможно, эволюционирующей со временем до обстановки активной континентальной окраины (в пользу чего свидетельствует появление в верхах разреза субщелочных базальтов и туфов андезитов с косослоистыми текстурами). Метаморфическая переработка пород в условиях амфиболитовой фации имела место в палеопротерозое, что подтверждается U–Pb датировками по циркону и титаниту, отвечающим  $1788 \pm 4$ ,  $1796 \pm 6$  и  $1786 \pm 11$  млн лет соответственно.

## Литература

Милькевич Р. И., Миллер Ю. В., Глебовицкий В. А., Богомолов Е. М., Гусева В. Ф. Толеитовый и известково-щелочной магматизм в северной части Тикшозерского зеленокаменного пояса: геохимические признаки субдукционной обстановки // Геохимия. 2003. № 12. С. 1262–1274.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008. 296 с.

## References

Mil'kevich R. I., Miller Yu. V., Glebovitskii V. A., Bogomolov E. M., Guseva V. F. Tholeiitic and calc-alkaline magmatism in the northern part of the Tikshozero Greenstone Belt: Geochemical evidence of a subduction environment. *Geochem. Int.* 2003. Vol. 41(12). P. 1152–1164.

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of the Archean Mobile Belts exemplified on Belomorian Province of the Fennoscandian Shield. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 296 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Мыскова Татьяна Анатольевна**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории геологии и геодинамики

e-mail: tmyskova@gmail.com

## CONTRIBUTORS:

**Myskova, Tatiana**

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

**Никонова Анна Сергеевна**

геолог I категории отдела региональной геологии  
и полезных ископаемых Западных районов

*e-mail: ann\_shtain@mail.ru*

**Никонов Константин Алексеевич**

ведущий специалист отдела региональной геологии  
и полезных ископаемых Западных районов

*e-mail: constantin\_spb@list.ru*

**Житникова Ирина Анатольевна**

заместитель заведующего отделом региональной  
геологии и полезных ископаемых Западных районов

*e-mail: iriina\_s@mail.ru*

**Львов Павел Алексеевич**

научный сотрудник

*e-mail: pavellvov@gmail.com*

**Nikonova, Anna**

Geologist

**Nikonov, Konstantin**

Leading Specialist

**Zhitnikova, Irina**

Deputy Head of Department

**Lvov, Pavel**

Researcher

УДК 552.31

## МАГМАТИЗМ ДОНСКОГО ТЕРРЕЙНА ВОЛГО-ДОНСКОГО ОРОГЕНА

М. Е. Петракова<sup>1,2\*</sup>, К. А. Савко<sup>2</sup>, Ш. К. Балтыбаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034), \*maribya@mail.ru

<sup>2</sup> Воронежский государственный университет (Университетская пл., 1, Воронеж, Россия, 394006)

Рассмотрены палеопротерозойские магматические комплексы западной части Волго-Донского орогена. Донской террейн развивался как вулканическая дуга на континентальной коре, а Лосевский – на океанической. Об этом свидетельствуют гранитоиды с разными геохимическими и изотопно-геохимическими характеристиками, которые формировались в результате постколлизийного растяжения коры орогена.

Ключевые слова: Донской террейн; Волго-Донской ороген; магматизм

Для цитирования: Петракова М. Е., Савко К. А., Балтыбаев Ш. К. Магматизм Донского террейна Волго-Донского орогена // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 107–110. doi: 10.17076/geo1654

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГГД РАН FMUW-2022-0002 Минобрнауки России.

## M. E. Petrakova<sup>1,2\*</sup>, K. A. Savko<sup>2</sup>, Sh. K. Baltybaev<sup>1</sup>. MAGMATISM OF THE DON TERRANE OF THE VOLGA-DON OROGEN

<sup>1</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia), \*maribya@mail.ru

<sup>2</sup> Voronezh State University (1 Universitetskaya Sq., 394006 Voronezh, Russia)

The Paleoproterozoic igneous complexes of the western part of the Volga-Don orogen are considered. The Don terrane developed as a volcanic arc on continental crust, while the Losevo terrane developed on oceanic crust. This is evidenced by granitoids with different geochemical and isotope-geochemical characteristics, which were formed by post-collision extension of the orogen crust.

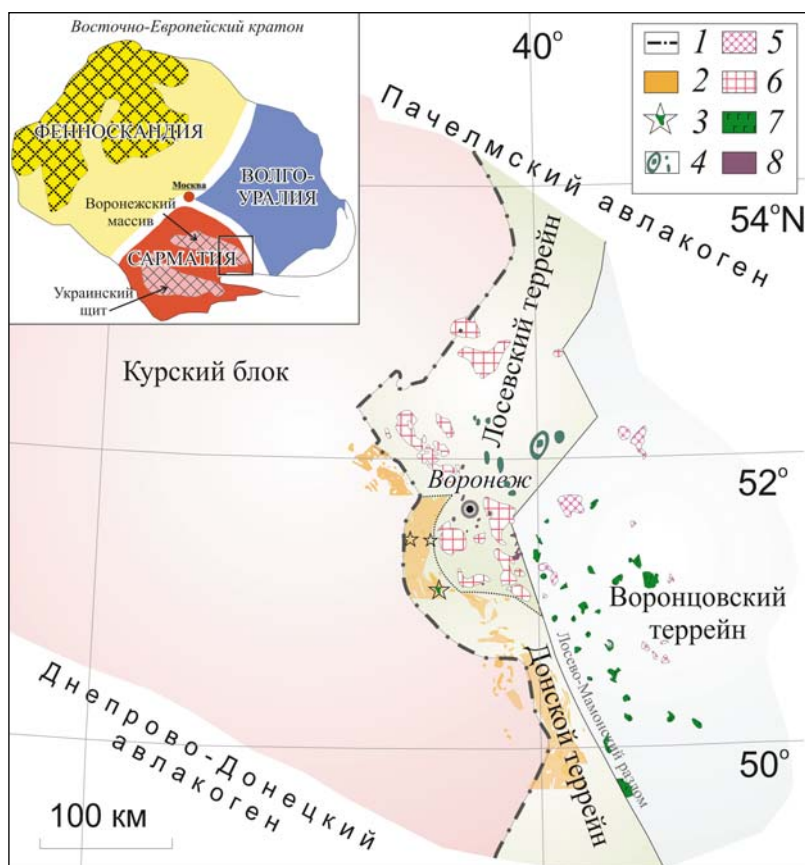
Keywords: Don terrane; Volga-Don orogen; magmatism

For citation: Petrakova M. E., Savko K. A., Baltybaev Sh. K. Magmatism of the Don terrane of the Volga-Don orogen. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:107–110. doi: 10.17076/geo1654

Палепротерозойский Волго-Донской ороген (ВДО) выделяется сравнительно недавно, его формирование связано с предшествующей коллизией Сарматии и Волго-Уралии 2,1 млрд лет назад [Щипанский и др., 2007; Vogdanova et al., 2012]. ВДО (рис.) перекрыт осадочным чехлом, и сведения о его составе и строении получены по немногочисленным материалам бурения. Слабоизученным вопросом является строение и состав западного борта ВДО в зоне его стыка с архейскими породами Курского блока. В большинстве работ [Щипанский и др., 2007 и ссылки в ней] данную область рассматривали в составе единой Лосевской (Липецко-Лосев-

ской) шовной зоны (ЛШЗ). В данном сообщении делается попытка суммировать современные данные о магматизме этой части ВДО и показать, что северная и южная части ЛШЗ отличаются автономным эндогенным развитием.

Вещественную неоднородность ЛШЗ отмечали и ранее [Египко, 1971 и др.]. Например, на геологической карте Воронежского кристаллического массива толщи отнесены к позднему архею, с выделением северной «лосевской» ассоциации и южной «донской». В недавних работах появились доказательства палеопротерозойского возраста пород этой структуры [Щипанский и др., 2007; Terentiev et al., 2017].



Строение западной части Волго-Донского орогена:

1 – западная граница ВДО; магматические комплексы: 2 – павловский гранитоидный; 3 – потуданский монцогабброгранодиоритовый; 4 – ольховский диорит-лейкогранодиоритовый; 5 – бобровский гранитов А- и S-типа; 6 – усманский тоналит-диорит-гранодиоритовый; 7 – мамонский и еланский базит-гипербазитовые; 8 – рождественский метагабброидный

Structure of the western part of the Volga-Don orogen:

1 – a western boundary of the orogen; 2 – Pavlovsk granitoids; 3 – Potudan monzogabbro-granodiorite; 4 – Olkhovskiy diorite-leucogranodiorite; 5 – Bobrov A- and S-type granites; 6 – Usman tonalite-diorite-granodiorite; 7 – Mamon and Elan mafic-ultramafic; 8 – metamorphosed gabbroids of the Rozhdestvensky complex

Нет единого мнения о природе пород и обстановке накопления лосевской серии (Лосевского террейна, ЛТ). Предполагается внутриконтинентальный рифтогенез [Чернышов и др., 1997], активная окраина восточно-тихоокеанского (кордильерского) [Щипанский и др., 2007] или западно-тихоокеанского типа либо система «окраинный бассейн – островная дуга» [Терентьев, Савко, 2016; Terentiev et al., 2017].

Вулканогенно-осадочные породы донской серии в составе Донского террейна (ДТ) стали выделяться недавно [Savko et al., 2014; Терентьев, 2018; Terentiev et al., 2020], но достоверные данные об их возрасте отсутствуют. Серия сложена мелкозернистыми биотитовыми гнейсами и амфиболитами, мраморами и кальцифирами. Метаморфизованные вулканы относятся к известково-щелочной высококалийевой серии и разделяются на железистую и высокомагнезиальную ветви. Вулканы донской серии близки к известково-щелочным породам лосевской серии, однако отличаются более высоким содержанием калия, тория [Терентьев, 2018]. Накопление толщ донской серии происходило в морском бассейне, что подтверждается прослоями мраморов и известково-силикатных пород (протолиты – известняки и мергели).

Породы лосевской и донской серии сильно отличаются от пород восточной части ВДО – так называемой воронцовской серии (в составе Воронцовского террейна, ВТ). Этот террейн сложен осадками турбидитового типа, представленными флишоидными песчано-сланцевыми отложениями [Щипанский и др., 2007].

В ДТ преобладают магнезиальные гранитоиды павловского комплекса возрастом 2,08–2,07 млрд лет [Terentiev et al., 2020] и железистые монцогабброгранодиориты потуданского комплекса возрастом 2,06 млрд лет [Петракова и др., 2022] (рис.). Породы резко обогащены LILE и LREE, особенно Ba, Sr, имеют  $\epsilon_{Nd}(t)$  от +0,2 до –4,2.  $\epsilon_{Nd}$  мафитов потуданского комплекса ниже, чем в кислых разностях павловского. В гранитоидах павловского комплекса ядра циркона до 2,8 млрд лет свидетельствуют о контаминации древней архейской корой.

ЛТ и ВТ сложены ювенильными породами возраста 2,2–2,1 млрд лет. ВТ содержит многочисленные тела гранитов S- и A-типа [Savko et al., 2014] и массивы ультраосновного-основного состава, тогда как в ЛТ и ДТ ТТГ-граниты и высоко-Mg-гранитоиды преобладают над базитами. Граниты S- и A-типов образовались 2,05–2,07 млрд лет назад, имеют  $\epsilon_{Nd}(t)$  от +2,0 до +2,6. Граниты S-типа рассматриваются как продукты плавления метаосадков [Savko et al., 2014].

Латеральная изменчивость с ростом в сторону Курского блока  $K_2O$ , LILE и LREE, понижение величины  $\epsilon_{Nd}$  в павловских гранитоидах в сравнении с гранитоидами ЛТ дают основание думать, что породы ДТ формировались на окраине или вблизи окраины древнего континента, чему не противоречат геофизические данные о присутствии архейской континентальной коры в ДТ [Минц и др., 2017].

Существенные различия в литологии породных ассоциаций ЛШЗ позволяют рассматривать ее северную и южную части не только как отличающиеся структурно-вещественно, но и как имеющие индивидуальные черты геологической эволюции. Об этом свидетельствуют, в частности, гранитоиды с разными геохимическими и изотопно-геохимическими характеристиками. Указанное позволяет выделить Лосевский (на севере) и Донской (на юге) террейны в составе этой шовной зоны.

## Литература

Египко О. И. Некоторые минералого-петрографические и геохимические особенности докембрийских гранитоидов юго-восточной части Воронежского кристаллического массива: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Воронеж, 1971. 367 с.

Минц М. В., Глазнев В. Н., Муравина О. М. Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры // Вестник ВГУ. Сер. Геология. 2017. № 4. С. 5–23.

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: Науки о Земле. 2022. Т. 67(1). С. 74–96. doi: 10.21638/spbu07.2022.105

Терентьев Р. А. Геология донской серии докембрия Воронежского кристаллического массива // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 2. С. 5–19.

Терентьев Р. А., Савко К. А. Высокомагнезиальные низкотитанистые габбро-гранитные серии в палеопротерозое Восточной Сарматии: геохимия и условия формирования // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 6. С. 1155–1183. doi: 10.15372/GiG20160605

Чернышов Н. М., Ненахов В. М., Лебедев И. П., Стрик Ю. Н. Модель геодинамического развития Воронежского кристаллического массива // Геотектоника. 1997. № 3. С. 21–30.

Щипанский А. А., Самсонов А. В., Петрова А. Ю., Ларионова Ю. О. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника. 2007. № 1. С. 43–70.

Bogdanova S. V., Postnikov A. V., Bibikova E. V. The Volga-Don orocline stitching Volgo-Sarmatia // Geophysical Research Abstracts. EGU. 2012. Vol. 14.

Savko K. A., Samsonov A. V., Larionov A. N., Larionova Yu. O., Bazikov N. S. Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of origin // *Petrology*. 2014. Vol. 22, no. 3. P. 205–233. doi: 10.1134/S0869591114030059

Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M. Paleoproterozoic evolution of the arc-back-arc system in the East Sarmatian Orogen (East European Craton): Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of the Losevo Volcanic Suite // *Am. J. Sci.* 2017. Vol. 317. P. 707–753. doi: 10.2475/06.2017.03

Terentiev R. A., Savko K. A., Petrakova M. E., Santosh M., Korish E. H. Paleoproterozoic granitoids of the Donterrane, East-Sarmatian Orogen: Age, magma source and tectonic implications // *Precambrian Res.* 2020. Vol. 346. P. 1–24. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105790

## References

Bogdanova S. V., Postnikov A. V., Bibikova E. V. The Volga-Don orocline stitching Volgo-Sarmatia. *Geophysical Research Abstracts*. EGU. 2012;14.

Chernyshov N. M., Nenakhov V. M., Lebedev I. P., Strik Yu. N. A model of geodynamic history of the Voronezh Massif in the Early Precambrian. *Geotectonics*. 1997;31(3):186–194.

Egipko O. I. Some mineralogical, petrographic and geochemical features of the Precambrian granitoids in the southeastern part of the Voronezh crystalline massif: PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. Voronezh; 1971. 367 p. (In Russ.)

Mints M. V., Glaznev V. N., Muravina O. M. Deep crustal structure in the South-East of the Voronezh Crystalline Massif on geophysical data: Geodynamic evolution of the Paleoproterozoic and the current state of the crust. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2017;4:5–23. (In Russ.)

Petrakova M. E., Terentiev R. A., Yurchenko A. V., Savko K. A. Geochemistry and geochronology of Paleoproterozoic quartz monzogabbro-monzodiorite-granodiorites of the Potudan Pluton (Volga-Don Orogen). *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2022;67(1):74–96. doi: 10.21638/spbu07.2022.105 (In Russ.)

Savko K. A., Samsonov A. V., Larionov A. N., Larionova Yu. O., Bazikov N. S. Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of origin. *Petrology*. 2014;22(3):205–233. doi: 10.1134/S0869591114030059

Shchipansky A. A., Samsonov A. V., Larionova Yu. O., Petrova A. Yu. Geodynamics of the Eastern Margin of Sarmatia in the Paleoproterozoic. *Geotectonics*. 2007;41(1):38–62. (In Russ.)

Terentiev R. A. Geology of the Don Series from the Early Precambrian Voronezh crystalline massif. *Proceedings of Voronezh State University: Geol.* 2018;2: 5–19. (In Russ.)

Terentiev R. A., Savko K. A. Paleoproterozoic high-Mg low-Ti gabbro-granite series in Eastern Sarmatia: Geochemistry and formation conditions. *Russian Geology and Geophysics*. 2016;57(6):907–932. doi: 10.1016/j.rgg.2015.06.012

Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M. Paleoproterozoic evolution of the arc-back-arc system in the East Sarmatian Orogen (East European Craton): Zircon SHRIMP Geochronology and Geochemistry of the Losevo Volcanic Suite. *Am. J. Sci.* 2017;317:707–753. doi: 10.2475/06.2017.03

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 Res.* 2020;346:1–24. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105790

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Петракова Марина Евгеньевна

младший научный сотрудник

e-mail: maribya@mail.ru

### Савко Константин Аркадьевич

д-р геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой полезных ископаемых и недропользования

e-mail: ksavko@geol.vsu.ru

### Балтыбаев Шаукет Каимович

д-р геол.-мин. наук, профессор, главный научный сотрудник

e-mail: shauket@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Petrakova, Marina

Junior Researcher

### Savko, Konstantin

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Head of the Department for Mineral Resources and Subsoil Use

### Baltybaev, Shauket

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

УДК 552.4+550.93

## ПСЕВДОТАХИЛИТЫ ГЛАВНОГО АНАБАРСКОГО РАЗЛОМА (АНАБАРСКИЙ ЩИТ): ПЕТРОЛОГО-РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ВОЗРАСТ ДЕФОРМАЦИЙ

О. П. Полянский\*, А. Д. Ножкин, Э. В. Сокол, А. В. Бабичев,  
А. Н. Семенов

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

В работе представлены результаты выполненного впервые  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования жильного материала псевдотачилита из деформационной зоны Главного Анабарского разлома (Северная Якутия). С использованием принципов термохронологии и реологических параметров деформации реконструирована глубина формирования псевдотачилитов. Их  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст ( $1910 \pm 24$  млн лет) сопоставлен с этапами формирования главных деформационных поясов Анабарского щита. Дана термохронологическая интерпретация полученных результатов. Предложен способ оценки глубины деформаций и величины дифференциальных напряжений.

Ключевые слова: псевдотачилит; Анабарский щит; деформации;  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст; реология

Для цитирования: Полянский О. П., Ножкин А. Д., Сокол Э. В., Бабичев А. В., Семенов А. Н. Псевдотачилиты Главного Анабарского разлома (Анабарский щит): петролого-реологические индикаторы плавления и возраст деформаций // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 111–115. doi: 10.17076/geo1678

Финансирование. Работа выполнена по госзаданию ИГМ СО РАН.

## O. P. Polyansky\*, A. D. Nozhkin, E. V. Sokol, A. V. Babichev, A. N. Semenov. PSEUDOTACHYLITES OF THE MAIN ANABAR FAULT (ANABAR SHIELD): PETROLOGICAL-RHEOLOGICAL INDICATORS OF MELTING AND THE AGE OF DEFORMATIONS

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy  
of Sciences (3 Acad. Koptuyug Ave., Novosibirsk, Russia), \*pol@igm.nsc.ru

The results of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of pseudotachylite vein material from the deformation zone of the Main Anabar Fault (Northern Yakutia) are presented. The formation depth of the pseudotachylites was reconstructed using thermochronology principles and rheological parameters of deformation. Their  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age ( $1910 \pm 24$  Ma) is aligned to the formation stages of the main deformation belts of the Anabar Shield. A thermochrono-

logical interpretation of the results is given. A method for estimating the depth of deformations and the magnitude of differential stresses is proposed.

Keywords: pseudotachylites; Anabar Shield; deformations;  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age; rheology

For citation: Polyansky O. P., Nozhkin A. D., Sokol E. V., Babichev A. V., Semenov A. N. Pseudotachylites of the main Anabar Fault (Anabar Shield): petrological-rheological indicators of melting and the age of deformations. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:111–115. doi: 10.17076/geo1678

Funding. The study was carried out under state assignment to the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Выполненные ранее реконструкции времени формирования деформационных поясов Анабарского щита опирались на возраст либо синтетектонических мигматитов, либо сопутствующих метаморфических, магматических или импактных событий. Они установлены в интервалах  $1920 \pm 10$ , 1916–1899 и  $1900 \pm 50$  млн лет соответственно. Однако возраст деформаций в пределах Главного Анабарского разлома до сих пор оставался неизвестным. С этой целью мы предприняли исследование пород из зоны разлома, претерпевших высокоскоростные тектонические деформации и локальное частичное плавление. В качестве индикаторов деформационных процессов использованы продукты дислокационного метаморфизма – псевдотахилиты (ПСТ). Эти породы состоят из стекловатого или тонкозернистого матрикса с реликтами зерен минералов или фрагментов вмещающей породы (рис. 1). Использование ПСТ уже доказало свою эффективность при датировании этапов тектогенеза докембрийских метаморфических комплексов [Морозов и др., 2020], а также при оценке динамических и термохронологических характеристик сейсмогенных разломов [Kirkpatrick et al., 2012].

Образцы анабарских псевдотахилитов (рис. 1, а, б) взяты из одного обнажения, где в зоне шириной  $\approx 50$  м они формируют систему многочисленных тонких (0,1–1,0 до 15 см) прожилков, секущих толщу сложного состава (биотит-гиперстеновые плагиогнейсы, двуполевошпатовые гнейсы, чарнокиты и двупироксен-плагиоклазовые кристаллосланцы) [Лутц, 1962]. Для определения  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраста деформационных событий в зоне Главного Анабарского разлома был выбран наиболее однородный образец ПСТ А-153-90 с валовым содержанием  $\text{K}_2\text{O}$  0,82 мас. %. Определение Ar-Ar-возраста проводилось в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск).

В возрастном спектре ПСТ присутствует отчетливое плато из семи последовательных ступеней (99 % выделенного  $^{39}\text{Ar}$ ). Рассчитанный по нему  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст составил  $1910 \pm 24$  млн лет. Интерпретация полученного значения возраста основывается на принципе температуры «закрытия» K/Ar-изотопной системы. При скорости остывания  $1\text{--}100$  °C/млн лет закрытие изотопной системы калишпата происходит в диапазоне температур  $295\text{--}370$  °C [Baxter, 2010]. Таким образом, полученный возраст соответствует моменту остывания псевдотахилита до  $T \leq 370$  °C. Учитывая стремительную закалку расплава, время его генерации и стеклования совпадает в пределах аналитической погрешности. Чтобы определить глубину породы на момент 1910 млн лет, был выполнен расчет палеогеотермы с учетом реальных теплофизических параметров и содержания радиоактивных элементов (U, Th, K) в породах Анабарского щита [Розен, 1992].

Из палеогеотермы следует, что фрикционное плавление и связанное с ним образование псевдотахилитов происходило не глубже 18–23 км (4,9–6,2 кбар). Приведенная оценка глубины датированного события, вызвавшего фрикционное плавление, согласуется с экспериментальными данными о реологическом поведении пород кварц-полевошпатового состава. На рис. 2 приведены профили предельных дифференциальных напряжений, испытываемых породами с преобладанием кварца либо плагиоклаза. Напряжения подчиняются закону Мора – Кулона при хрупкопластической деформации (линейные участки профиля) и закону дислокационной ползучести (крипа) (участки с экспоненциальной зависимостью от температуры). С учетом построенной палеогеотермы переход от хрупких деформаций в режим ползучести происходит в диапазоне от  $\sim 200$  °C (кварц, влажный кварцит) до  $\sim 370$  °C (плагиоклаз, базальт с 35–45 % PI). Температура закрытия K/Ar-



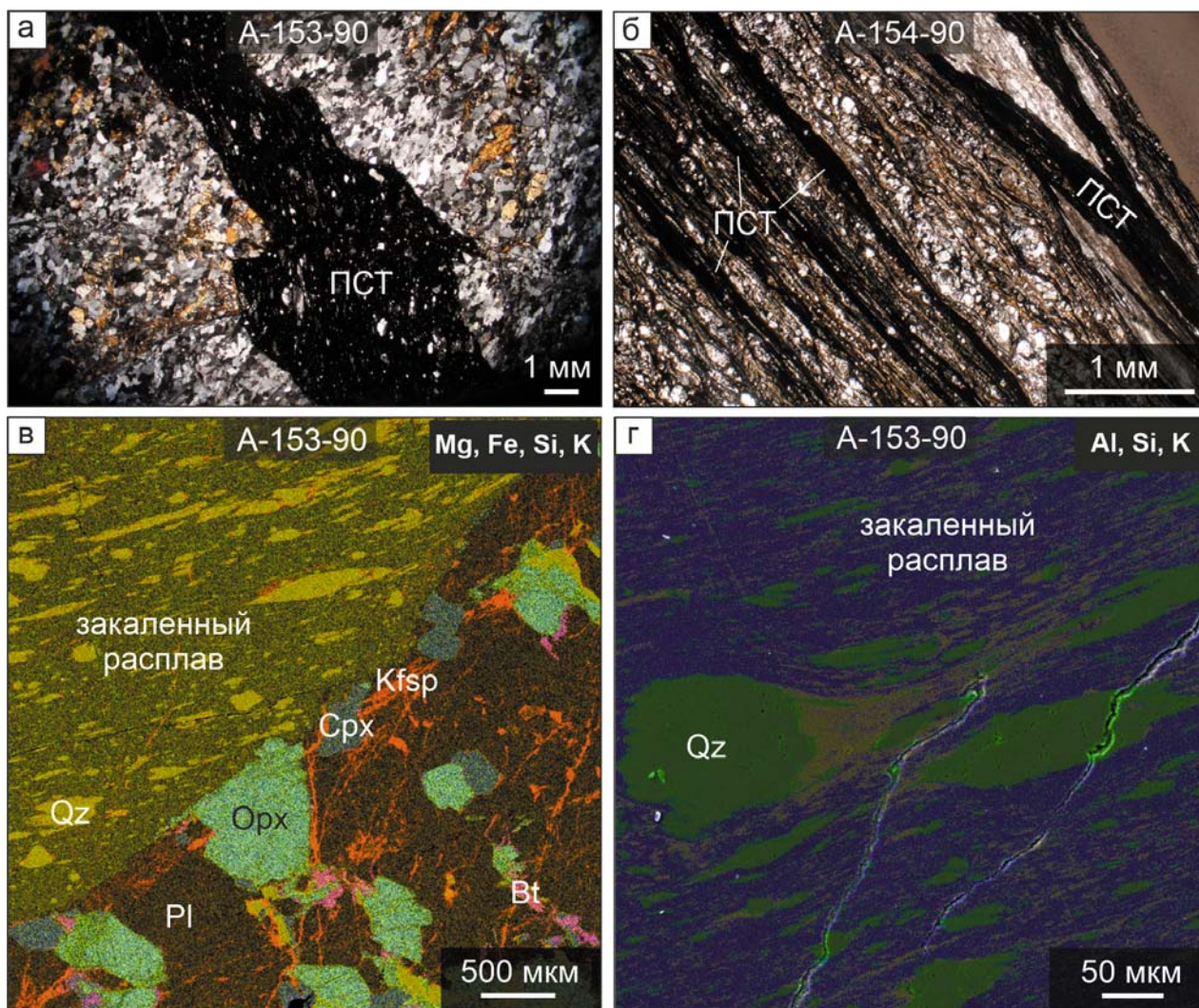


Рис. 1. Структуры и текстуры псевдотахилитов. Оптические изображения, николи × (а, б) и многослойные карты характеристического излучения Mg, Fe, Al, Si и K (в, г):

а – жильный псевдотахилит (ПСТ); б – чередование полос катаклазита по мигматизированному основному кристаллосланцу, милонита и псевдотахилита; в – резкий контакт псевдотахилитового прожилка и вмещающего биотит-двопироксенового плагиогнейса; г – распределение реликтов пластично деформированных зерен кварца в псевдотахилитовом прожилке

Fig. 1. Structures and textures of pseudotachylites. Optical images, cross nicols (a, б), and maps of Mg, Fe, Al, Si, and K distributions (в, г):

а – veined pseudotachylite used for determining the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age; б – thin alternating bands of finely ground cataclasite in migmatized base crystalline schist, mylonite, and pseudotachylite itself; в – sharp contrast of the pseudotachylite vein and the host biotite-bipyroxene plagiogneiss; г – distribution of relicts of plastically deformed quartz grains in the pseudotachylite vein. PST is pseudotachylite; Bt is biotite; Cpx is clinopyroxene; Kfsp is potassium feldspar; Opx is orthopyroxene; Pl is plagioclase; and Qz is quartz

изотопной системы КПШ в зависимости от скорости охлаждения составляет  $290\text{--}370\text{ }^\circ\text{C}$ , что попадает в интервал РТ-условий, при которых кварц переходит в состояние крипа, а плагиоклаз еще остается хрупким, как это наблюдается в шлифах ПСТ.

Мы предполагаем образование ПСТ путем фрикционного плавления кислого гранулитового протолита в условиях быстротекущего, возможно сейсмического, события. Такими со-

бытиями могут являться взбросовые перемещения по Анабарскому разлому и подъем гранулитовых комплексов нижней коры. Коллизионный характер движений со взбросами в ЮЗ направлении отмечается для конца раннепротерозойского времени у двух основных деформационных поясов Анабарского щита – Котуйканской и Билляхской коллизионных зон [Милановский и др., 2017]. В процессе коллизии породы с глубины гранулитового метаморфизма  $33\text{--}41\text{ км}$

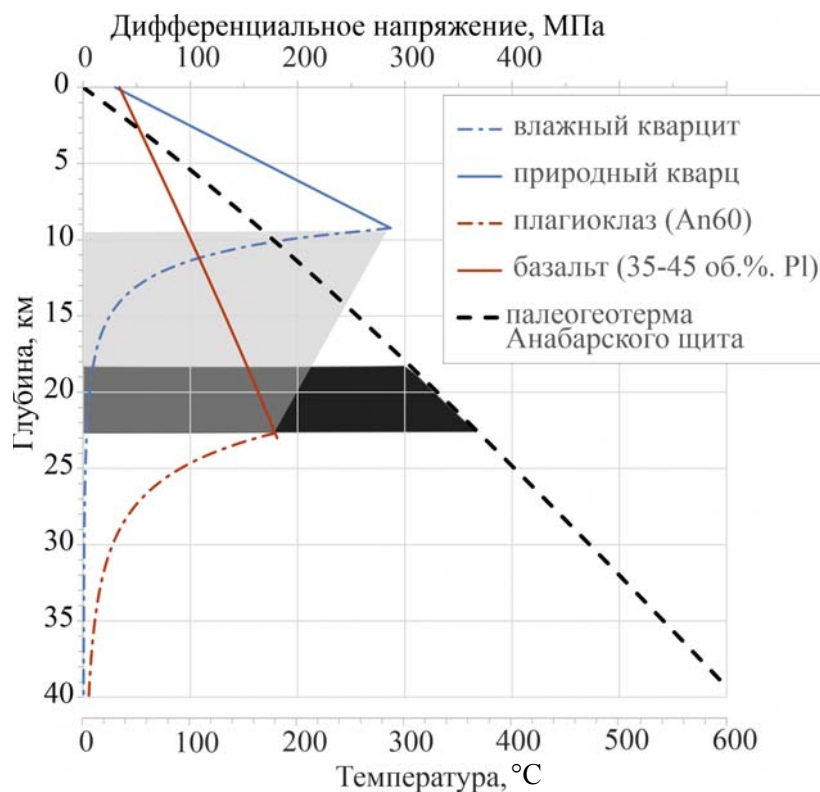


Рис. 2. Профили предельных дифференциальных напряжений в кварце и плагноклазе (верхняя горизонтальная ось), характеризующие параметры перехода хрупких в ползучие деформации. Зависимости построены для Qtz- и Pl-содержащих материалов с использованием реологических данных из [Полянский и др., 2022]. Скорость деформации ползучести принята  $10^{-15} \text{ с}^{-1}$ . Пунктирная линия – палеогеотерма (нижняя ось), построенная на основе данных о содержании радиоактивных источников тепла в нижнепротерозойских тектонит-гранит-мигматитовых породах Анабарского щита [Розен, 1992]. Серым показан интервал глубины, а черным – интервал T датированного события

Fig. 2. Profiles of the limiting differential stresses in quartz and plagioclase (the top horizontal axis) characterizing the parameters of the brittle-to-ductile transition. The yield-strength envelopes are plotted for quartz and plagioclase-bearing materials using the data from [Polyansky et al., 2022]. The creep rate was taken equal to  $10^{-15} \text{ s}^{-1}$ . Paleogeotherm (dotted line, the bottom horizontal axis) constructed from the data on the content of radioactive heat sources in the Lower Proterozoic tectonite-granite-migmatite rocks of the Anabar Shield [Rosen, 1992]. The intervals of the depth and the temperature for the event dated are shown in light gray and black

(9–11 кбар [Ножкин и др., 2019]) были перемещены на среднекоровый уровень (18–23 км) в результате высокоскоростных (сейсмогенных) деформаций, сопровождавшихся локальным плавлением.

Таким образом, псевдотахилиты Главного Анабарского разлома являются индикаторами деформаций, связанных с эксгумацией высоко-метаморфизованных комплексов, а сам разлом может рассматриваться в качестве одноранговой коллизионной структуры наряду с основными деформационными зонами Анабара.

## Литература

Лутц Б. Г. Псевдотахилиты Анабарского массива и вопросы из генезиса // Геология и геофизика. 1962. № 11. С. 98–102.

Милановский С. Ю., Кабан М. К., Розен О. М., Егоркин А. В. Геофизические особенности строения коры Анабарского щита // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2017. Вып. 36, № 4. С. 56–71.

Морозов Ю. А., Юдин Д. С., Травин А. В., Смольская А. И., Кулаковский А. Л., Матвеев М. А. Первые находки и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование псевдотахилитов в палеопротерозойском зонально метаморфизован-

ном Ладожском комплексе Фенноскандии // Доклады РАН. 2020. Т. 493, № 1. С. 5–9. doi: 10.31857/S2686739720070117

Ножкин А. Д., Лиханов И. И., Савко К. А., Крылов А. А., Серов П. А. Сапфиринсодержащие гранулиты Анабарского щита // Геохимия. 2019. Т. 64, № 5. С. 486–502. doi: 10.31857/S0016-7525645486-502

Полянский О. П., Ножкин А. Д., Сокол Э. В., Зинovieв С. В., Семенов А. Н., Некипелова А. В. Псевдотачилиты Главного Анабарского разлома (Северная Якутия) – петрологические и хронологические индикаторы плавления при высокоскоростных тектонических деформациях // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 503, № 1. С. 18–25. doi: 10.31857/S2686739722030094

Розен О. М. Теплогенерация земной коры Анабарского щита и проблемы формирования нижней коры континентов // Геология и геофизика. 1992. № 12. С. 22–29.

Baxter E. F. Diffusion of noble gases in minerals // Rev. Mineral. Geochem. 2010. Vol. 72. P. 509–558. doi: 10.2138/RMG.2010.72.11

Kirkpatrick J. D., Dobson K. J., Mark D. F., Shipton Z. K., Brodsky E. E., Stuart F. M. The depth of pseudotachylyte formation from detailed thermochronology and constraints on coseismic stress drop variability // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. B06406. doi: 10.1029/2011JB008846

## References

Baxter E. F. Diffusion of noble gases in minerals. *Rev. Mineral. Geochem.* 2010;72:509–558. doi: 10.2138/RMG.2010.72.11

Kirkpatrick J. D., Dobson K. J., Mark D. F., Shipton Z. K., Brodsky E. E., Stuart F. M. The depth of pseudotachylyte formation from detailed thermochronology and constraints on coseismic stress drop variability. *J. Geophys. Res.* 2012;117:B06406. doi: 10.1029/2011JB008846

Lutts B. G. Pseudotachylites of the Anabar Massif and questions of their genesis. *Geol. Geofiz.* 1962;11:98–102. (In Russ.)

Milanovskii S. Yu., Kaban M. K., Rozen O. M., Egorokin A. V. Geophysical features of the crust structure of the Anabar Shield. *Vestn. Kamchatskoi Reg. Assots. Uchebn.-Nauchn. Tsentra. Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association. Earth Sciences.* 2017;36(4):56–71. (In Russ.)

Morozov Y. A., Matveev M. A., Kulakovskiy A. L., Yudin D. S., Travin A. V., Smulskaya A. I. The first discovery of pseudotachylites in the Paleoproterozoic Ladoga zonal metamorphosed complex of Fennoscandia and their  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating. *Doklady Earth Sciences.* 2020;493(1):485–489. doi: 10.1134/S1028334X20070119

Nozhkin A. D., Likhonov I. I., Krylov A. A., Sавко К. А., Серов П. А. Sapphirine-bearing granulites of the Anabar Shield. *Geochem. Int.* 2019;57(5):524–539. doi: 10.1134/S0016702919050070

Polyansky O. P., Nozhkin A. D., Sokol E. V., Zinoviev S. V., Semenov A. N., Nekipelova A. V. Pseudotachylites of the main Anabar Fault (Northern Yakutia): Petrological and chronological indicators of melting during high rate tectonic deformations. *Doklady Earth Sciences.* 2022;503(1):86–92. doi: 10.1134/S1028334X22030096

Rozen O. M. Heat generation of the Earth's crust of the Anabar Shield and problems of continental lower crust formation. *Geol. Geofiz.* 1992;12:22–29. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Полянский Олег Петрович

д-р геол.-мин. наук, заведующий лабораторией  
e-mail: pol@igm.nsc.ru

### Ножкин Александр Дмитриевич

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

### Сокол Элина Владимировна

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

### Бабичев Алексей Владимирович

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник  
e-mail: babichev@igm.nsc.ru

### Семенов Александр Николаевич

канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник  
e-mail: Semenov@igm.nsc.ru

## CONTRIBUTORS:

### Polyansky, Oleg

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory

### Nozhkin, Alexander

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

### Sokol, Ellina

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

### Babichev, Aleksey

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

### Semenov, Alexander

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher

УДК 55 (234.851)

## ВОЗРАСТНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ВЕРХНЕГО ДОКЕМБРИЯ ПРИПОЛЯРНОГО И ПОЛЯРНОГО УРАЛА: К ВОПРОСУ О ВРЕМЕНИ ЗАЛОЖЕНИЯ ТИМАНСКОЙ ПАССИВНОЙ ОКРАИНЫ

А. М. Пыстин\*, Ю. И. Пыстина, О. В. Гракова, Н. С. Уляшева

Институт геологии ФИЦ Коми научного центра Уральского отделения РАН  
(ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167982),  
\*pystin@geo.komisc.ru

Дан анализ U-Pb датировок детритовых цирконов из базальных отложений верхнего докембрия Приполярного и Полярного Урала. Приведенный материал с учетом имеющихся данных по другим районам севера Урала, а также Тимана свидетельствует о том, что в отличие от Южного Урала, где известен полный разрез рифея, тимано-североуральский верхний докембрий начинается с отложений, пограничных по возрасту между средним и поздним рифеем, скорее всего, позднерифейских. Это указывает на позднерифейское время заложения Тиманской пассивной окраины. Высказано предположение, что северо-восток Балтики в допозднерифейское время находился во внутренней части фрагмента Колумбии, избежавшей деструкции вплоть до вхождения Балтики в Родинию.

Ключевые слова: Приполярный и Полярный Урал; верхний докембрий; базальные отложения; петрогеохимические данные; детритовые цирконы; U-Pb возраст

Для цитирования: Пыстин А. М., Пыстина Ю. И., Гракова О. В., Уляшева Н. С. Возрастные ограничения верхнего докембрия Приполярного и Полярного Урала: к вопросу о времени заложения Тиманской пассивной окраины // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 116–119. doi: 10.17076/geo1689

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-27-00119.

### A. M. Pystin\*, Yu. I. Pystina, O. V. Grakova, N. S. Ulyasheva. AGE LIMITS OF THE UPPER PRECAMBRIAN SUBPOLAR AND POLAR URALS: TOWARDS THE TIMING OF THE TIMAN PASSIVE MARGIN FORMATION

*Institute of Geology, Komi Science Centre, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (54 Pervomayskaya St., 167982 Syktывkar, Komi, Russia), \*pystin@geo.komisc.ru*

An analysis of U-Pb datings of detrital zircons from Upper Precambrian basal deposits of the Subpolar and Polar Urals is given. The presented material, taking into account the available data for other North Ural regions as well as Timan, indicates that, in contrast to

the Southern Urals, where the complete Riphean section is known, the Timan-North Urals Upper Precambrian begins with deposits bordering in age between the Middle and the Late Riphean, most likely Late Riphean. This indicates the Late Riphean age of the Timan passive margin. It is suggested that in pre-Late Riphean times, northeastern Baltica was located in the interior of the Columbia fragment which avoided destruction up until the integration of Baltica into Rodinia.

**Keywords:** Subpolar and Polar Urals; Upper Precambrian; basal deposits; petrogeochemical data; detrital zircons; U-Pb age

**For citation:** Pystin A. M., Pystina Yu. I., Grakova O. V., Ulyasheva N. S. Age limits of the Upper Precambrian Subpolar and Polar Urals: towards the timing of the Timan passive margin formation. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:116–119. doi: 10.17076/geo1689

**Funding.** The study was funded by Russian Science Foundation grant # 22-27-00119.

Одной из важнейших проблем геологии докембрия северной части Урала является выделение и обоснование возраста базальных отложений верхнего протерозоя, и решение ее связано с вопросом о времени заложения Тиманской пассивной окраины. В последние годы установлено, что на севере Урала в отличие от его южных районов отсутствуют нижнерифейские отложения. Выделяемые в стратиграфических схемах Приполярного Урала нижнерифейские стратониты – маньхобеинская и щокуринская свиты [Стратиграфические..., 1993] – на самом деле принадлежат к нижнепротерозойскому кристаллическому основанию [Глубинное..., 2011; Пыстин, Пыстина, 2019]. При этом маньхобеинская свита выделена ошибочно на месте средне-низкотемпературных диафоритов по породам няртинского гнейсо-мигматитового комплекса, залегающего в нижней части разреза приполярноуральского докембрия. Возраст раннего этапа метаморфизма пород, слагающих няртинский комплекс и щокуринскую свиту, около 2,1 млрд лет [Пыстин, Пыстина, 2019].

Верхнедокембрийский разрез на Приполярном Урале начинается с пуйвинской свиты, на Полярном Урале – с няровейской серии.

Пуйвинская свита залегает со стратиграфическим и структурным несогласием на породах няртинского гнейсо-мигматитового комплекса и метатерригенно-карбонатной щокуринской свиты раннепротерозойского возраста. Свита сложена серыми и зеленовато-серыми слюдисто-альбит-кварцевыми сланцами с прослоями амфиболовых и известковых сланцев и кварцитов. В основании пуйвинской свиты фрагментарно выделяется ошизская толща слюдисто-полевошпатовых кварцитов и кварцито-песчаников с линзами гравелитов и конгломератов. Мощность ошизской толщи

достигает 350 м, а разреза пуйвинской свиты в целом – 1600 м. Среднерифейский возраст свиты принимается на основании ее залегания под фаунистически охарактеризованными верхнерифейскими толщами, а также по наличию в породах среднерифейских (?) микрофоссилий, диагностика которых признается не очень надежной.

Няровейская серия обрамляет харьбийский и марункеуский метаморфические комплексы раннепротерозойского возраста. Она залегает на глубокометаморфизованных породах со стратиграфическим и структурным несогласием. Среднерифейский возраст пород обосновывается по их положению под известняками немурюганской свиты с микрофитолитами позднего рифея. Серия (снизу вверх) подразделяется на терригенно-карбонатную верхнехарьбийскую свиту мощностью 400–500 м и терригенно-вулканогенную минисейшорскую свиту мощностью 1400–1500 м [Душин и др., 2014].

Для уточнения временных границ формирования базальных отложений верхнего протерозоя Приполярного и Полярного Урала (пуйвинской свиты и няровейской серии), а также установления возраста размываемых пород субстрата выполнены изотопные исследования детритовых цирконов из метатерригенных отложений U-Pb LA-SF-ICP-MS методом в Геологическом институте СО РАН (Россия, г. Улан-Удэ).

Проба (№ 21) для выделения цирконов из пород пуйвинской свиты отобрана на правом берегу руч. Николайшор (левого притока р. Кожим) в 7,5 км выше устья (65.0468° с.ш. 60.6098° в.д.). Здесь обнажается нижняя часть свиты, сложенная серыми мелко-среднезернистыми биотит-(хлорит)-мусковит-альбит-кварцевыми сланцами. Цирконы представлены в основном хорошо окатанными зернами ша-

ровидной и эллипсоидной формы, окрашенными в дымчатые и коричневато-кремовые тона. Размер зерен 0,10–0,25 мм, поверхность равномерно шероховатая. Циркон с максимальной датировкой имеет раннепротерозойский возраст ( $1959 \pm 52$  млн лет), с минимальной – позднерифейский ( $867 \pm 71$  млн лет). Основная выборка возрастов, включающая 93 анализа (или 99 %), охватывает интервал 867–1579 млн лет. Датировки группируются в две возрастные популяции: 1179–867 млн лет (67 % анализов) и 1579–1274 (30 % анализов). Минимальные значения датировок детритовых цирконов ( $867 \pm 71$ ,  $889 \pm 55$ ,  $892 \pm 86$ ,  $907 \pm 54$ ,  $909 \pm 46$ ,  $910 \pm 77$  млн лет) указывают на то, что формирование отложений пуйвинской свиты завершилось не раньше 900 млн лет назад. Незначительная мощность и фрагментарное развитие нижележащих пород ошизской толщи пуйвинской свиты при существенной доле в общей выборке цирконов с неопротерозойскими датировками (22 определения, или 23 %) дают основание для утверждения, что нижняя возрастная граница базальных отложений верхнего докембрия (пуйвинской свиты) на Приполярном Урале не выходит за пределы позднего рифея.

Проба (№ 4–28) для выделения цирконов из пород няровейской серии отобрана на берегу руч. Нярошор, левого притока р. Немурьеган, в 4 км от его устья ( $67.4489^\circ$  с.ш.  $66.4261^\circ$  в.д.). Обнажение относится к нижней части минисейшорской свиты няровейской серии и сложено среднезернистыми хлорит-мусковит-альбит-кварцевыми сланцами. Цирконы в этой пробе в морфологическом отношении являются более разнообразными в сравнении с цирконами из пуйвинской свиты. Они разделяются по степени окатанности зерен, их форме, окраске и внутреннему строению. Хорошо окатанные цирконы составляют незначительную часть от общего количества цирконовой фракции в породе (около 5–10 %). Это прозрачные светло-розовые и светло-желтые округлые зерна размером 0,1–0,2 мм с характерной шероховатой поверхностью. Основная часть зерен представлена относительно слабоокатанными цирконами светло-розовой окраски, иногда с хорошо сохранившимися первичными морфологическими признаками. Циркон с максимальной датировкой имеет позднеархейский возраст (2859 млн лет), с минимальной – позднерифейский ( $660,1 \pm 5$  млн лет). Основная выборка датировок, включающая 77 анализов (или 97 %), охватывает интервал 2028,1–660,1 млн лет и имеет полимодальный характер распределения с максимумами на

уровнях 1700, 1230 и 680 млн лет. Минимальные значения датировок детритовых цирконов (660,1; 661,9; 666,5; 668,7 и 669,1 млн лет) указывают на то, что формирование отложений минисейшорской свиты завершилось не раньше 660 млн лет назад. Учитывая, что проба метапесчаника, из которой датированы детритовые цирконы, отобрана из нижней части разреза минисейшорской свиты, а мощность нижележащих отложений верхнехарбейской свиты не превышает 500 м, можно с высокой степенью вероятности утверждать, что возрастной интервал накопления пород всего разреза няровейской серии ограничивается поздним рифеем.

Результаты проведенных геохронологических исследований, наряду с имеющимися данными о возрастных ограничениях верхнего докембрия разных районов северной части Урала, а также Тимана [Pystin et al., 2020 и ссылки в ней], дают основание считать, что здесь в отличие от южных районов Урала отсутствуют нижнерифейские толщи и значительная часть (или весь объем) среднерифейского разреза. Верхнедокембрийский разрез начинается с отложений, пограничных по возрасту между средним и поздним рифеем, скорее всего, позднерифейских, что указывает на позднерифейское время раскрытия океанического бассейна и заложения Тиманской пассивной окраины. Это может быть объяснено высоким стоянием территории северо-востока Балтики в допозднерифейское время и нахождением ее во внутренней части фрагмента Колумбии, избежавшей деструкции вплоть до вхождения Балтики в Родинию.

## Литература

- Глубинное* строение Тимано-Североуральского региона / Ред. А. М. Пыстин. Сыктывкар: Геопринт, 2011. 261 с.
- Душин В. А., Сердюкова О. П., Малюгин А. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-42-VII, VIII. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 384 с.
- Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Докембрий Приполярного Урала: хроностратиграфический аспект // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 2. С. 34–52. doi: 10.17076/geo904
- Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург: Уралгеолком, 1993.
- Pystin A. M., Pystina Yu. I., Ulyasheva N. S., Grakova O. V. U-Pb dating of detrital zircons from basal Post Paleoproterozoic metasediments in the Subpolar and Polar Urals: Evidence for a Cryogenian, not Mesoproterozoic age // International Geology Review. 2020. Vol. 62, iss. 17. P. 2189–2202. doi: 10.1080/00206814.2019.1689533

## References

Dushin V. A., Serdukova O. P., Malugin A. A. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Series Polar-Urals. Sheet Q-42-VII, VIII. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI; 2014. 384 p. (In Russ.)

Pystin A. M. (ed.). The deep structure of the Timan-Northern Ural region. Syktyvkar: Geoprint; 2011. 261 p. (In Russ.)

Pystin A. M., Pystina Yu. I. The Precambrian in the Sub-Polar Urals: The chronostratigraphic aspect. *Trudy*

*Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;2:34–52. doi: 10.17076/geo904 (In Russ.)

Pystin A. M., Pystina Yu. I., Ulyasheva N. S., Grakova O. V. U-Pb dating of detrital zircons from basal Post Paleoproterozoic metasediments in the Subpolar and Polar Urals: Evidence for a Cryogenian, not Mesoproterozoic age. *International Geology Review*. 2020;62(17):2189–2202. doi: 10.1080/00206814.2019.1689533

*Stratigraphic diagrams of the Urals (Precambrian, Paleozoic)*. Ekaterinburg: Uralgeolkom; 1993. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Пыстин Александр Михайлович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник, профессор, заведующий лабораторией

e-mail: [pystin@geo.komisc.ru](mailto:pystin@geo.komisc.ru)

### Пыстина Юлия Ивановна

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: [pystina@geo.komisc.ru](mailto:pystina@geo.komisc.ru)

### Гракова Оксана Васильевна

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник

e-mail: [ygrakov@yandex.ru](mailto:ygrakov@yandex.ru)

### Уляшева Наталия Сергеевна

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

e-mail: [nsulasheva@geo.komisc.ru](mailto:nsulasheva@geo.komisc.ru)

## CONTRIBUTORS:

### Pystin, Alexander

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Professor, Head of Laboratory

### Pystina, Yulia

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

### Grakova, Oksana

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

### Ulyasheva, Natalia

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

УДК 551.71/72

## ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ГИДРОСФЕРЫ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ САРМАТИИ

К. А. Савко<sup>1\*</sup>, А. Б. Кузнецов<sup>2</sup>, И. М. Васильева<sup>2</sup>,  
М. Ю. Овчинникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский университет (Университетская пл., 1, Воронеж, Россия, 394018),  
\*ksavko@geol.vsu.ru

<sup>2</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург,  
Россия, 199034)

В карбонатных породах Курского блока Сарматии зафиксированы свидетельства глобальных пертурбаций в атмосфере и гидросфере Земли. Доломиты роговской свиты формировались на пассивной континентальной окраине и характеризуются хондритовым Y/No отношением, отсутствием аномалий  $\text{Ce}^*$ , значениями  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ , типичными для морских карбонатов неорархей и раннего палеопротерозоя. Следовательно, их накопление происходило до великого окислительного события (GOE). Известняки тимской свиты контрастно отличаются отрицательными аномалиями  $\text{Ce}^*$ , суперхондритовым Y/No отношением и аномально высокими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  от 10,4 до 12,1 ‰ V-PDB. Из этого следует, что карбонаты тимской свиты формировались после GOE во время события Ятулий-Ломагунди. Их Pb-Pb возраст  $2233 \pm 8$  млн лет близок к его нижней границе.

Ключевые слова: Сарматия; палеопротерозой; карбонатные породы

Для цитирования: Савко К. А., Кузнецов А. Б., Васильева И. М., Овчинникова М. Ю. Изотопно-геохимические свидетельства глобальных изменений состава гидросферы в палеопротерозое Сарматии // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 120–123. doi: 10.17076/geo1679

**К. А. Savko<sup>1\*</sup>, A. B. Kuznetsov<sup>2</sup>, I. M. Vasilyeva<sup>2</sup>, M. Yu. Ovchinnikova<sup>1</sup>.**  
**ISOTOPE GEOCHEMISTRY EVIDENCE FOR GLOBAL CHANGES IN SARMATIA**  
**HYDROSPHERE COMPOSITION DURING THE PALEOPROTEROZOIC**

<sup>1</sup> Voronezh State University (1 Universitetskaya Sq., 394018 Voronezh, Russia),  
\*ksavko@geol.vsu.ru

<sup>2</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences  
(2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)

Carbonate rocks of the Kursk block of Sarmatia reveal evidence of global perturbations in the atmosphere and hydrosphere of the Earth. Dolomites of the Rogovskaya



Formation accumulated on the passive continental margin and are characterized by a chondrite Y/Ho ratio, absence of Ce\* anomalies, and  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values typical of Neoproterozoic and Early Paleoproterozoic marine carbonates. Therefore, their accumulation took place before the GOE. Limestones of the Tim Formation are contrastingly distinguished by having negative Ce\* anomalies, a superchondrite Y/Ho ratio, and abnormally high values of  $\delta^{13}\text{C} = 10.4$  to  $12.1$  ‰ V-PDB. It follows that carbonates of the Tim Formation were formed after the GOE during the Yatuli-Lomagundi event. Their Pb-Pb age of  $2233 \pm 8$  Ma is close to its lower boundary.

Keywords: Sarmatia; Paleoproterozoic; carbonate rocks

For citation: Savko K. A., Kuznetsov A. B., Vasilyeva I. M., Ovchinnikova M. Yu. Isotope geochemistry evidence for global changes in Sarmatia hydrosphere composition during the Paleoproterozoic. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:120–123. doi: 10.17076/geo1679

С начала палеопротерозоя ( $\approx 2,5$ – $2,1$  млрд лет) в истории Земли стали происходить важные изменения в окислительно-восстановительной обстановке атмосферы и гидросферы: рост концентрации свободного кислорода (великое окислительное событие, GOE), резкое увеличение содержания изотопа  $^{13}\text{C}$  в карбонатных породах (Ломагунди-Ятулийское событие), глобальные оледенения [Schidlowski et al., 1976; Karhu, Holland, 1996]. Это время также известно как период затухания тектонических процессов и длительного развития континентальной коры в обстановках пассивных окраин, когда накапливались мощные толщи железисто-кремнистых формаций (ЖКФ) и формировались карбонатные платформы [Condie et al., 2009]. Эти глобальные изменения проявлены и в кратоне Сарматия.

В Курско-Криворожском бассейне Сарматии доломиты роговской свиты перекрывают ЖКФ. Завершает разрез палеопротерозоя тимская свита, которая разделяется на две толщи – нижнюю, где преобладают углеродистые сланцы и присутствуют карбонаты, и верхнюю, с широко развитыми метабазами с возрастом  $\approx 2,1$  млрд лет [Tsybulyaev et al., 2021]. Все породы подверглись складчатости и метаморфизму зеленосланцевой фации с возрастом  $\approx 2,07$  млрд лет.

В доломитах роговской свиты отсутствует отрицательная Ce-аномалия ( $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,94$ – $0,98$ ) и отмечается положительная аномалия Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,3$ – $2,0$ ). Значения отношения Y/Ho (26–34) близки к хондритовому (Y/Ho = 32). Для известняков тимской свиты характерна отрицательная Ce-аномалия ( $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,55$ – $0,72$ ), отсутствие Eu-аномалии ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* \approx 1$ ) и суперхондритовое Y/Ho отношение (44–51). Таким образом, тимские известняки контрастно отличаются отрицательными

Ce\*-аномалиями, отсутствием Eu-аномалий и суперхондритовым Y/Ho отношением.

Отсутствие отрицательной Ce\*-аномалии в доломитах роговской свиты и наличие ее в тимских известняках предполагает их формирование в различных окислительных условиях: до и после накопления в атмосфере и гидросфере свободного кислорода (GOE).

Значения  $\delta^{13}\text{C}$  изотопного состава углерода в доломитах роговской свиты – от  $0,3$  до  $3,0$  ‰ V-PDB. От них контрастно отличаются известняки тимской свиты аномально высокими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  – от  $6,0$  ‰ в кровле разреза до  $10,4$ – $12,1$  ‰ V-PDB в остальной его части. Такие высокие значения содержания тяжелого изотопа углерода четко указывают, что формирование карбонатных пород происходило во время Ломагунди-Ятулийского события в период  $2,22$ – $2,06$  млрд лет назад.

Состав  $\delta^{18}\text{O}$  в доломитах роговской свиты от  $(-5,1)$  до  $(-10,0)$  близко соответствует изотопному составу кислорода палеопротерозойских доломитов  $(-8,1) \pm 2,5$  ‰ [Veizer et al., 1992]. Почти такие же значения зафиксированы в известняках тимской свиты  $\delta^{18}\text{O} = (-9,5) - (-13,7)$  ‰ V-PDB. Поэтому карбонатные породы тимской и роговской свит являются типичными представителями морских карбонатов раннего палеопротерозоя.

Определение возраста накопления палеопротерозойских карбонатов в Курском блоке представляет сложную задачу из-за отсутствия в разрезах кислых вулканитов, содержащих минералы-геохронометры. В настоящее время известны два изотопно-геохронологических репера: 1) возраст внутриплитных риолитов  $2,61$  млрд лет [Savko et al., 2019], на коре выветривания которых залегают терригенные породы стойленской свиты, согласно сменяющиеся мощными ЖКФ коробковской свиты, и 2) возраст базальтов тимской свиты

2,1 млрд лет [Tsybulyaev et al., 2021]. Полмиллиарда лет – огромный интервал для развития палеопротерозойского осадочного бассейна, который требует детализации. Для этой цели для известняков тимской свиты была рассчитана Pb-Pb изохрона по четырем точкам, соответствующая возрасту  $2233 \pm 8$  млн лет (СКВО = 0,43).

Исследования палеопротерозойских карбонатных отложений в Курском блоке позволили сделать следующие выводы: 1) карбонатные породы роговской свиты формировались на пассивной континентальной окраине. В них отмечается хондритовое Y/No отношение, отсутствуют отрицательные  $Se_{SN}$ - и проявлены положительные  $Eu_{SN}$ -аномалии. Изотопные характеристики  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  отвечают типичным морским карбонатам неорхей и раннего палеопротерозоя, и их накопление происходило до GOE; 2) известняки тимской свиты контрастно отличаются от роговских карбонатов отрицательными аномалиями  $Se^*$ , суперхондритовым Y/No отношением и аномально высокими значениями  $\delta^{13}C$  от 10,4 до 12,1 ‰ V-PDB. Из этого следует, что карбонаты тимской свиты формировались после GOE во время Ломагунди-Ятулийского события. Pb-Pb возраст  $2233 \pm 8$  млн лет близок к его нижней границе.

## Литература

Цыбуляев С. В., Савко К. А., Самсонов А. В., Кориш Е. Х. Палеопротерозойские рифтогенные вулканы OIB- и MORB-типов Курского блока Восточной Сарматии: петрология и геодинамика // Петрология. 2021. Т. 29, № 2. С. 136–171. doi: 10.31857/S0869590321020060

Condie K. C., O'Neill C., Aster R. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250 My on Earth // Earth and Planet. Sci. Lett. 2009. Vol. 282. P. 294–298. doi: 10.1016/j.epsl.2009.03.033

Karhu J. A., Holland H. D. Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen // Geology. 1996. Vol. 24(10). P. 867–870.

Savko K. A., Samsonov A. V., Kholina N. V., Lariov A. N., Zaitseva M. V., Korish E. H., Bazikov N. S., Terentiev R. A. 2.6 Ga high-Si rhyolites and granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and application for the Archaean palaeocontinental correlations // Precambrian Res. 2019. Vol. 322. P. 170–192. doi: 10.1016/j.precamres.2019.01.006

Schidlowski M., Eichmann R., Junge C. E. Carbon isotope geochemistry of the Precambrian Lomagundi carbonate province, Rhodesia // Geochim. Cosmochim. Acta. 1976. Vol. 40. P. 449–455.

Veizer J., Clayton R. N., Hinton R. W. Geochemistry of Precambrian carbonates: IV. Early Paleoproterozoic ( $2.25 \pm 0.25$ ) seawater // Geochim. Cosmochim. Acta. 1992. Vol. 56, no. 3. P. 875–885.

## References

Condie K. C., O'Neill C., Aster R. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250 My on Earth. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2009;282:294–298. doi: 10.1016/j.epsl.2009.03.033

Karhu J. A., Holland H. D. Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen. *Geology*. 1996;24(10):867–870.

Savko K. A., Samsonov A. V., Kholina N. V., Lariov A. N., Zaitseva M. V., Korish E. H., Bazikov N. S., Terentiev R. A. 2.6 Ga high-Si rhyolites and granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and application for the Archaean palaeocontinental correlations. *Precambrian Res.* 2019;322:170–192. doi: 10.1016/j.precamres.2019.01.006

Schidlowski M., Eichmann R., Junge C. E. Carbon isotope geochemistry of the Precambrian Lomagundi carbonate province, Rhodesia. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1976;40:449–455.

Tsybulyaev S. V., Savko K. A., Samsonov A. V., Korish E. H. Paleoproterozoic OIB- and MORB-type rift volcanics of the Kursk Block, Eastern Sarmatia: petrology and geodynamics. *Petrology*. 2021;29(2):114–147. doi: 10.1134/S0869591121020065

Veizer J., Clayton R. N., Hinton R. W. Geochemistry of Precambrian carbonates: IV. Early Paleoproterozoic ( $2.25 \pm 0.25$ ) seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1992;56(3):875–885.

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Савко Константин Аркадьевич

д-р геол.-мин. наук, заведующий кафедрой, профессор

e-mail: ksavko@geol.vsu.ru

### Кузнецов Антон Борисович

чл.-корр. РАН, д-р геол.-мин. наук, директор

e-mail: antonbor9@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Savko, Konstantin

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Department, Professor

### Kuznetsov, Anton

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

**Васильева Ирина Михайловна**

научный сотрудник

*e-mail: vasilievaim@yandex.ru*

**Овчинникова Марина Юрьевна**

старший преподаватель

*e-mail: ovchinnikova@geol.vsu.ru*

**Vasilyeva, Irina**

Researcher

**Ovchinnikova, Marina**

Senior Lecturer

УДК 552.48

## РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ДАТИРОВАНИЯ ЭКЛОГИТОВ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА

С. Г. Скублов<sup>1,2\*</sup>, А. В. Березин<sup>1,3</sup>, Л. И. Салимгараева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034), \*skublov@yandex.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет (21-я линия В.О., 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106)

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет (Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, Россия, 199034)

Проведен объективный критический анализ всех точек зрения на проблему времени эцлогитового метаморфизма в пределах Беломорского подвижного пояса (БПП) и аргументов, лежащих в их основе. Авторская трактовка возраста эцлогитового метаморфизма в пределах БПП основана на комплексе независимых изотопно-геохимических методов датирования – локальном U-Pb методе по гетерогенным цирконам с магматическими ядрами и эцлогитовыми каймами, Lu-Hf и Sm-Nd методах по породообразующим минералам эцлогитового парагенезиса – гранату и омфациту. Все три метода независимо друг от друга определяют возраст эцлогитового метаморфизма как свекофенский, с одним и тем же значением – около 1900 млн лет.

Ключевые слова: эцлогиты; докембрий; Беломорский подвижный пояс; петрохронология; изотопный возраст; циркон; U-Pb метод; Sm-Nd метод; Lu-Hf метод

Для цитирования: Скублов С. Г., Березин А. В., Салимгараева Л. И. Результаты комплексного датирования эцлогитов Беломорского подвижного пояса // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 124–127. doi: 10.17076/geo1696

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГГД РАН FMUW-2022-0005.

## S. G. Skublov<sup>1,2\*</sup>, A. V. Berezin<sup>1,3</sup>, L. I. Salimgaraeva<sup>1,2</sup>. RESULTS OF INTEGRATED DATING OF ECLOGITES OF THE BELOMORIAN MOBILE BELT

<sup>1</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)

<sup>2</sup> St. Petersburg Mining University (2, 21st Liniia V.O., 199106 St. Petersburg, Russia)

<sup>3</sup> St. Petersburg State University (7/9 Universitetskaya Nab., 199034 St. Petersburg, Russia)

The paper provides a generalized overview of all points of view on the timing of eclogite metamorphism in the Belomorian Mobile Belt (BMB) with critical analysis of the underlying reasoning. The authors' interpretation of the age of eclogite metamorphism

within the BMB is based on a combination of independent isotope-geochemical dating methods: local U-Pb dating of heterogeneous zircons with magmatic cores and eclogite rims, Lu-Hf and Sm-Nd dating of rock-forming minerals of eclogite paragenesis (garnet and omphacite). All the three methods independently date eclogite metamorphism as Svecofennian, with the same age of about 1900 Ma.

Keywords: eclogites; Precambrian; Belomorian Mobile Belt; petrochronology; isotopic age; zircon; U-Pb method; Sm-Nd method; Lu-Hf method

For citation: Skublov S. G., Berezin A. V., Salimgaraeva L. I. Results of integrated dating of eclogites of the Belomorian Mobile Belt. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:124–127. doi: 10.17076/geo1696

Funding. The study was carried out within government-funded research theme of the Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS FMUW-2022-0005.

Эклогиты Беломорского подвижного пояса (БПП) являются ключевым объектом для геодинамических реконструкций не только БПП, но и Фенноскандинавского щита в целом. Одним из главных вопросов для эклогитов БПП является установление времени их формирования. Интерпретация возраста эклогитов БПП как архейского позволила ряду исследователей распространить на этот сегмент архейской коры геодинамические механизмы тектоники плит современного типа. В настоящее время геохронологические данные, полученные по эклогитам БПП в целом, интерпретируются по-разному [Skublov et al., 2022].

Установленные в работе [Скублов и др., 2012] закономерности распределения редких и редкоземельных элементов в цирконе из эклогитов (аномально пониженные содержание Th и величина Th/U отношения, значительно пониженное содержание всего спектра REE, и особенно LREE, пониженное содержание Y, U, P и повышенное – Hf) универсальны, они не зависят от типа протолита эклогитов (метабазиты, метаультрабазиты, гнейсы) и величины давления (эклогиты высокого и сверхвысокого давления). Комплексное использование этих признаков позволяет уверенно отличать эклогитовый циркон от циркона магматического генезиса и метаморфического циркона, не связанного с высокобарическим метаморфизмом. Для эклогитов БПП (на примере районов Салмы, Гридино и Керетского архипелага) установлено, что центральные части (ядра) циркона из эклогитов-метагаббро с варьирующим возрастом от 2,2 до 2,8–2,9 млрд лет являются магматическими, а их внешние метаморфические каймы с возрастом около 1,9 млрд лет по редкоэлементному составу соответствуют типовым эклогитовым цирконам.

Для циркона из пегматитов, секущих будину эклогитов на острове Столбиха (район

с. Гридино), установлено, что возраст  $1890 \pm 2$  млн лет для основной популяции циркона является возрастом внедрения пегматитов. Это значение возраста служит верхней границей для эклогитов БПП с возрастом около 1900 млн лет [Skublov et al., 2020]. Датировка  $2743 \pm 10$  млн лет, полученная по цирконам с хорошо проявленной секториальной (мозаичной) зональностью, интерпретируется нами, с учетом распределения в них редких элементов, как возраст гранулитового метаморфизма, ранее установленного в различных районах БПП. Аналогично следует интерпретировать возраст ядер цирконов из будины эклогитов, которую сечет пегматитовая жила ( $2702 \pm 25$  млн лет) [Скублов и др., 2012].

Для проверки правильности вывода о свекофеннском времени эклогитового метаморфизма в БПП, установленного по цирконам с учетом их геохимических особенностей [Скублов и др., 2011, 2012], проведено Lu-Hf датирование для эклогитов северо-западной части БПП (месторождение Куру-Ваара) и района Гридино по гранату, клинопироксену и породе в целом, результаты которого также показали возраст около 1,9 млрд лет. Показано, что гранаты обладают проградной зональностью с пиком содержания Lu в центре зерен [Melnik et al., 2021]. Соответственно, Lu-Hf возраст гранатов отражает время кристаллизации прежде всего центральной части зерен. При этом Sm-Nd изохронный возраст для той же ассоциации эклогитов северо-западной части БПП также имеет значение около 1,9 млрд лет. Значение возраста гранатов по Sm-Nd изотопной системе отражает скорее возраст основного объема зерен (включая краевые части), учитывая характер зональности гранатов по Sm и Nd [Melnik et al., 2021].

Для проверки равновесия зерен и оторочек циркона с возрастом  $\sim 1,9$  млрд лет и граната

эколитов проведено локальное определение изотопного состава кислорода методом SIMS [Melnik et al., 2021]. Результаты исследования в минералах из будин эколитов Куру-Ваары (с магматическим протолитом архейского возраста) показали, что изотопный состав кислорода в гранате ( $\delta^{18}\text{O} = 4,0\text{--}5,0 \text{ ‰}$ ) находится в равновесии с составом палеопротерозойского (около 1,9 млрд лет) циркона ( $\delta^{18}\text{O} = 4,5\text{--}5,4 \text{ ‰}$ ); значения же  $\delta^{18}\text{O}$  в магматических доменах циркона архейского возраста (примерно 2,88 млрд лет) значительно выше (5,1–5,9 ‰) и неравновесны с таковыми в гранате.

Таким образом, по нашим данным, эколиты БПП являются одними из самых древних высокотемпературных пород с достоверно установленным возрастом метаморфизма около 1,9 млрд лет при различном возрасте магматического протолита в интервале от 2,2 до 2,9 млрд лет.

## Литература

Скублов С. Г., Березин А. В., Бережная Н. Г. Общие закономерности состава цирконов из эколитов по редким элементам применительно к проблеме возраста эколитов Беломорского подвижного пояса // Петрология. 2012. Т. 20, № 5. С. 470.

Скублов С. Г., Березин А. В., Мельник А. Е. Палеопротерозойские эколиты северо-западной части Беломорского подвижного пояса, район Салмы: состав и изотопно-геохимическая характеристика минералов, возраст метаморфизма // Петрология. 2011. Т. 19, № 5. С. 493–519.

Melnik A. E., Skublov S. G., Rubatto D., Müller D., Li X. H., Li Q. L., Berezin A. V., Herwartz D., Machevariani M. M. Garnet and zircon geochronology of the Paleoproterozoic Kuru-Vaara eclogites, northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield // Precambrian Res. 2021. Vol. 353. Art. 106014. doi: 10.1016/j.precamres.2020.106014

Skublov S. G., Berezin A. V., Li X. H., Li Q. L., Salimgaraeva L. I., Travin V. V., Rezvukhin D. I. Zircons from a pegmatite cutting eclogite (Gridino, Belomorian Mobile Belt): U-Pb-O and trace element constraints on eclogite metamorphism and fluid activity // Geosciences. 2020. Vol. 10(5). P. 197–218. doi: 10.3390/geosciences10050197

Skublov S. G., Berezin A. V., Melnik A. E., Astafiev B. Y., Voinova O. A., Alekseev V. I. Protolith age

of eclogites from the southern part of Pezhostrov Island, Belomorian Belt: protolith of metabasites as indicator of eclogitization time // Petrology. 2016. Vol. 24(6). P. 594–607. doi: 10.1134/S0869591116040056

Skublov S. G., Berezin A. V., Salimgaraeva L. I. Comment on Volodichev et al. Archean zircons with omphacite inclusions from eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: The first finding. Minerals 2021, 11, 1029 // Minerals. 2022. Vol. 12, no. 2. Art. 141. doi: 10.3390/min12020141

## References

Melnik A. E., Skublov S. G., Rubatto D., Müller D., Li X. H., Li Q. L., Berezin A. V., Herwartz D., Machevariani M. M. Garnet and zircon geochronology of the Paleoproterozoic Kuru-Vaara eclogites, northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield. Precambrian Res. 2021;353:106014. doi: 10.1016/j.precamres.2020.106014

Skublov S. G., Berezin A. V., Berezhnaya N. G. General relations in the trace-element composition of zircons from eclogites with implications for the age of eclogites in the Belomorian Mobile Belt. Petrology. 2012;20(5):427–449. doi: 10.1134/S0869591112050062

Skublov S. G., Berezin A. V., Li X. H., Li Q. L., Salimgaraeva L. I., Travin V. V., Rezvukhin D. I. Zircons from a pegmatite cutting eclogite (Gridino, Belomorian Mobile Belt): U-Pb-O and trace element constraints on eclogite metamorphism and fluid activity. Geosciences. 2020;10(5):197–218. doi: 10.3390/geosciences10050197

Skublov S. G., Berezin A. V., Melnik A. E. Paleoproterozoic eclogites in the Salma Area, Northwestern Belomorian Mobile Belt: composition and isotopic geochronologic characteristics of minerals and metamorphic age. Petrology. 2011;19(5):470–495. doi: 10.1134/S0869591111050055

Skublov S. G., Berezin A. V., Melnik A. E., Astafiev B. Y., Voinova O. A., Alekseev V. I. Protolith age of eclogites from the southern part of Pezhostrov Island, Belomorian Belt: protolith of metabasites as indicator of eclogitization time. Petrology. 2016;24(6):594–607. doi: 10.1134/S0869591116040056

Skublov S. G., Berezin A. V., Salimgaraeva L. I. Comment on Volodichev et al. Archean zircons with omphacite inclusions from eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: The first finding. Minerals 2021, 11, 1029. Minerals. 2022;12(2):141. doi: 10.3390/min12020141

Поступила в редакцию / received: 24.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Скублов Сергей Геннадьевич**

д-р геол.-мин. наук, доцент, главный научный сотрудник ИГГД РАН, профессор Санкт-Петербургского горного университета

e-mail: skublov@yandex.ru

## CONTRIBUTORS:

**Skublov, Sergey**

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

**Березин Алексей Васильевич**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
ИГГД РАН, доцент кафедры геологии месторождений  
полезных ископаемых ИНЗ СПбГУ

*e-mail: berezin-geo@yandex.ru*

**Салимгараева Ляйсан Ильшатовна**

младший научный сотрудник ИГГД РАН, аспирант Санкт-  
Петербургского горного университета

*e-mail: fluoritecaf2@mail.ru*

**Berezin, Aleksey**

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

**Salimgaraeva, Lyaysan**

Junior Researcher, Doctoral Student

УДК 55 (551.21)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРОЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ АРХЕЙСКОГО И ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ОРОГЕНОВ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

**А. И. Слабунов**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

Проведен сравнительный анализ глубинного строения, вещественного состава главных структурно-вещественных комплексов, истории формирования мезо-неоархейского Карело-Беломорско-Кольского и палеопротерозойских Лапландско-Кольского и Свекофеннского орогенов Фенноскандинавского щита. Отмечается, что мощность литосферы в пределах первого из них (архейского) составляет 200–250 км, тогда как во вторых – 150–200 км, при этом в архитектуре их земной коры ведущую роль играют покровно-надвиговые структуры. В интервалах 3,0–2,6 и 2,0–1,65 млрд лет в каждом из них фиксируются проявления спрединга, субдукции, коллизии, мантийных плюмов и общая последовательность событий, сопоставимая с историей становления орогенов в фанерозое. Продолжительность становления рассмотренных архейского и палеопротерозойских орогенов также сходна – около 350 млн лет. Это свидетельствует о том, что геодинамическая природа орогенов архея и палеопротерозоя не отличается между собой и от современных структур этого типа.

Ключевые слова: ороген; архей; палеопротерозой; Свекофеннский ороген; Лапландско-Кольский ороген; Карельский кратон; Фенноскандинавский щит

Для цитирования: Слабунов А. И. Сравнительный анализ строения и эволюции архейского и палеопротерозойских орогенов Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 128–131. doi: 10.17076/geo1673

Финансирование. Работа является вкладом в исследования ИГ КарНЦ РАН по теме АААА-А18-118020290085-4.

### **A. I. Slabunov. ARCHAEOAN AND PALEOPROTEROZOIC OROGENS OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD: COMPARATIVE ANALYSIS OF ARCHITECTURE AND CRUSTAL EVOLUTION**

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

Comparative analysis of the structure and mineralogical composition of major structural-mineralogical complexes and the evolution of the Meso-Neoproterozoic Karelian-Belomorian-Kola and the Paleoproterozoic Lapland-Kola and Svecofennian orogens



of the Fennoscandian Shield was performed. It is noted that the lithosphere of the former (Archean) is 200–250 km thick, while the latter is 150–200 km thick. Overlapping-over-thrust structures contribute the most to the Earth's crust architecture of both orogens. Some 3.0–2.6 and 2.0–1.65 Ga ago, each of them displayed spreading, subduction, collision and mantle plumes, and the general sequence of these events is comparable to that of the Phanerozoic. Both the Archean and the Paleoproterozoic orogens formed about 350 Ma. This shows that the Archean and the Paleoproterozoic orogens do not differ in the geodynamic nature from each other and from modern structures of this type.

**Keywords:** orogen; Archean; Paleoproterozoic; Svecofennian orogen; Lapland-Kola orogen; Karelian Craton; Fennoscandian Shield

**For citation:** Slabunov A. I. Archean and Paleoproterozoic orogens of the Fennoscandian Shield: comparative analysis of architecture and crustal evolution. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:128–131. doi: 10.17076/geo1673

**Funding.** The study is a contribution to the activities of the Institute of Geology KarRC RAS within state-ordered theme AAAA-A18-118020290085-4.

Восточная часть Фенноскандинавского щита включает два архейских кратона (Карельский и Мурманский), разделенных палеопротерозойским коллизионным Лапландско-Кольским орогеном; к Карельскому кратону на западе примыкает палеопротерозойский аккреционный Свекофеннский ороген [Балаганский и др., 2016; Слабунов и др., 2021].

На примере Фенноскандинавского щита можно сопоставить строение (архитектуру), историю формирования, особенности состава важнейших комплексов – индикаторов геодинамических обстановок архейских (3,0–2,6 млрд лет) и палеопротерозойских (2,0–1,65 млрд лет) орогенов.

Важно учитывать, что анализируемые структуры Фенноскандинавского щита в рамках суперконтинентальной цикличности были элементами более крупных геологических образований. Архейское ядро щита – это фрагмент крупного складчатого (орогенного) пояса, сформировавшегося в ходе становления суперконтинентов Кенорленд [Lubnina, Slabunov, 2011], а палеопротерозойские Свекофеннский и Лапландско-Кольский орогены – элементы более крупной структуры в составе суперконтинента Колумбия/Нуна [Lahtinen et al., 2008].

Мощность литосферы в пределах архейской части щита оценивается в 200–250 км [Meshcheryakova et al., 2022], тогда как в пределах палеопротерозойской – в 150–200 км [Artemieva, 2011], при этом в архитектуре земной коры обеих частей ведущую роль играют покровно-надвиговые структуры [Глубинное..., 2010; Слабунов и др., 2010].

Информация об архейском орогене Фенноскандинавского щита содержится в геологиче-

ских образованиях Карельской, Беломорской, Кольской и Мурманской провинций, и, исходя из этого, его можно именовать Карельско-Беломорско-Кольским [Слабунов, 2020]. Становление ювенильной континентальной земной коры в этом орогене начинается около 3,0–2,95 млрд лет в обрамлении древних (3,5–3,2 млрд лет) блоков континентальной литосферы [Слабунов, 2020; Слабунов и др., 2021 и ссылки в них]. В составе орогена известны фрагменты мезоархейской (3,0–2,8 млрд лет) океанической коры типа океанических плато (базальт-коматиитовые ассоциации), супрасубдукционных офиолитов (Серякский, Ириногорский) [Слабунов и др., 2021 и ссылки в ней]. Выделяется четыре главных субдукционно-аккреционных эпизода становления континентальной коры: 3,00–2,94; 2,9–2,85; 2,82–2,78; 2,75–2,72 млрд лет, в ходе которых формируются отдельные террейны [Слабунов, 2020]. Таким образом, продолжительность каждого эпизода – около 30–50 млн лет. Период 2,71–2,68 млрд лет знаменует коллизией Карельского и Кольско-Мурманского блоков (супертеррейнов) с образованием Беломорского коллизионного пояса [Слабунов и др., 2021] и его последующим коллапсом, завершившимся около 2,66 млрд лет. В западной части орогена синхронно с коллизией формируются осадки типа вакки (комплекс Нурмес). Таким образом, общая продолжительность формирования архейского орогена – 340 млн лет (интервал между 3,00–2,66 млрд лет), продолжительность отдельных субдукционно-аккреционных эпизодов – 30–50 млн лет. При формировании орогена реконструируются проявления следующих геодинамических процессов: спрединг, субдукция, коллизия, мантийные плюмы.

Палеопротерозойские Лапландско-Кольский (2,0–1,89 млрд лет) и Свекофеннский (1,95–1,65 млрд лет) орогены хотя и развиваются независимо друг от друга, но являются, как отмечено выше, составляющими единой крупной системы орогенов в составе суперконтинента Колумбия/Нуна [Lahtinen et al., 2008; Балаганский и др., 2016]. Первый из них – это коллизионный ороген [Lahtinen et al., 2008; Балаганский и др., 2016 и ссылки в них], а второй – аккреционный [Балтыбаев, 2013; Nironen, 2017]. Формирование Лапландско-Кольского коллизионного орогена начинается около 2,0 млрд лет с раскола древней континентальной коры и формирования океана красноморского типа. Период 1,96–1,92 млрд лет – это раннеорогенная стадия его развития, когда происходит образование новой (ювенильной) континентальной коры орогена в процессе субдукции. Период 1,93–1,90 (1,89) млрд лет – это коллизионная стадия, сопровождающаяся надвиговой тектоникой [Lahtinen, Nuhma, 2019 и ссылки в ней], утолщением коры и метаморфизмом пород в условиях гранулитовой фации повышенных давлений и температуры, а также эклогитовой [Слабунов и др., 2021 и ссылки в ней]. В период 1,89–1,82 млрд лет происходит разрушение орогена, эксгумация пород нижней и средней коры.

Формированию Свекофеннского аккреционного орогена также предшествовало растяжение края континентальной коры древнего континента (образовавшегося на фундаменте архейского Карельского орогена) и формирование в период 2,0–1,95 млрд лет новой океанической литосферы (ее фрагменты сохранились в виде офиолитов Йормуа, Оутокумпу, Нетто). В период 1,92–1,65 млрд лет происходит формирование новой континентальной коры в процессе субдукции, ее амальгамация и последующая аккреция с архейским кратоном. Рост коры отмечается в ходе по крайней мере четырех субдукционно-аккреционных (коллизионных) событий: 1,92–1,89 млрд лет (саво-лапландская орогенция), 1,87–1,84 млрд лет (феннийская), 1,83–1,80 млрд лет (свекобалтийская) и 1,8–1,65 млрд лет (формирование Трансскандинавского магматического пояса) [Lahtinen et al., 2008; Балтыбаев, 2013; Nironen, 2017]. Прерывистый характер становления континентальной коры Свекофеннского орогена ярко подчеркивается пространственно-временной асимметрией в проявлении высокотемпературного/умеренно-низкобарического метаморфизма: раннесвекофеннского (1,89–1,87 млрд лет) во внешней (северной) зоне, а позднесвекофеннского (1,83–1,79 млрд лет) – во внутренней (южной) зоне [Балтыбаев, 2013].

Общая продолжительность становления палеопротерозойского Лапландско-Кольско-Свекофеннского орогена – 350 млн лет (в интервале 2,00–1,65 млрд лет), хотя наиболее активные его фазы сконцентрированы в узких (40 млн лет) интервалах 1,96–1,92 и 1,93–1,89 млрд лет.

Сравнительный анализ архитектуры земной коры, вещественного состава главных структурно-вещественных комплексов, истории формирования мезо-неоархейского и палеопротерозойского аккреционно-коллизионных орогенных поясов (на примере Карело-Беломорско-Кольского, Лапландско-Кольского и Свекофеннского орогенов Фенноскандинавского щита) показывает, что геологические структуры данного класса за период 3,0–1,65 млрд лет не претерпели кардинальных изменений в закономерностях и основных геодинамических механизмах становления. В это время уже отмечаются проявления спрединга, субдукции, коллизии, мантийных плюмов. Продолжительность становления рассмотренных архейского и палеопротерозойского орогенов также близка – около 350 млн лет.

Таким образом, геодинамические механизмы были сходны для архейских и для палеопротерозойских орогенов. Однако структуры отличаются мощностью литосферы. Этот феномен может быть связан с тем, что древняя (архейская) океаническая литосфера была более мощной, и это приводило к формированию в ходе субдукции более мощной континентальной литосферы. При этом механизмы тектоники литосферных плит на Земле уже действовали в мезоархее.

## Литература

Балаганский В. В., Горбунов И. А., Мудрук С. В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофеннский орогены (Балтийский щит) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 3. С. 5–11.

Балтыбаев Ш. К. Свекофеннский ороген Фенноскандинавского щита: вещественно-изотопная зональность и ее тектоническая интерпретация // Геотектоника. 2013. № 6. С. 44–59.

Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. Т. 1 / Ред. А. Ф. Морозов. М.: Геокарт-ГЕОС, 2010. 408 с.

Слабунов А. И. Архейские и палеопротерозойские орогены Фенноскандинавского щита и геодинамика ранней Земли // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Т. 2. Материалы III Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2020. С. 299–302.

Слабунов А. И., Балаганский В. В., Щипанский А. А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 648–675. doi: 10.15372/GiG2021116

Слабунов А. И., Шаров Н. В., Исанина Э. В. и др. Сейсмотомографическая модель земной коры по профилю ГСЗ – ОГТ «Суша-Море» Калевала-Кемь-горло Белого моря // Строение и история развития литосферы. Российские исследования по программе МПГ 2007/2008 / Ред. Ю. Г. Леонов. Т. 4. М.: Paulsen, 2010. С. 291–308.

Artemieva I. The lithosphere. An interdisciplinary approach. Cambridge University Press, 2011. 794 p.

Lahtinen R., Huhma H. A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen // Precambrian Res. 2019. Vol. 330. P. 1–19.

Lahtinen R., Garde A., Melezhik V. A. Paleoproterozoic evolution of Fennoscandia and Greenland // Episodes. 2008. Vol. 31, no. 1. P. 20–28.

Lubnina N. V., Slabunov A. I. Reconstruction of the Kenorland supercontinent in the Neoproterozoic based on paleomagnetic and geological data // Moscow University Geology Bulletin. 2011. Vol. 66, no. 4. P. 242–249.

Nironen M. Guide to the geological map of Finland – Bedrock 1:1 000 000 // Bedrock of Finland at the scale 1:1 000 000 – Major stratigraphic units, metamorphism and tectonic evolution. Special paper 60. GSF, 2017. P. 41–76.

Meshcheryakova A., Slabunov A., Vaganova N., Rychanchik M. Architecture of the subcontinental lithospheric mantle of the Archean segment of the Fennoscandian Shield: analysis of seismic data // Tectonophysics. 2022. Vol. 841. Art. 229541. doi: 10.1016/j.tecto.2022.229541

## References

Artemieva I. The lithosphere. An interdisciplinary approach. Cambridge University Press; 2011. 794 p.

Balagansky V. V., Gorbunov I. A., Mudruk S. V. Palaeoproterozoic Lapland-Kola and Svecofennian Orogens (Baltic Shield). Vestnik KNTs RAN. 2016;3(26): 5–11. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K. Svecofennian Orogen of the Fennoscandian Shield: Compositional and isotopic zoning and its tectonic interpretation. Geotectonics. 2013;47(6):411–423. (In Russ.)

Morozov A. F. (ed.). Deep structure, evolution and minerals of the Early Precambrian base of the East European Craton: Interpretation of materials on basic profile 1-EB, profiles 4B and TATSEYS. Vol. 1. Moscow: Geomaps-GEOS; 2010. 408 p. (In Russ.)

Lahtinen R., Huhma H. A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen. Precambrian Res. 2019;330:1–19.

Lahtinen R., Garde A., Melezhik V. A. Paleoproterozoic evolution of Fennoscandia and Greenland. Episodes. 2008;31(1):20–28.

Lubnina N. V., Slabunov A. I. Reconstruction of the Kenorland supercontinent in the Neoproterozoic based on paleomagnetic and geological data. Moscow University Geology Bulletin. 2011;66(4):242–249.

Meshcheryakova A., Slabunov A., Vaganova N., Rychanchik M. Architecture of the subcontinental lithospheric mantle of the Archean segment of the Fennoscandian Shield: analysis of seismic data. Tectonophysics. 2022;841;229541. doi: 10.1016/j.tecto.2022.229541

Nironen M. Guide to the geological map of Finland – Bedrock 1:1 000 000. Bedrock of Finland at the scale 1:1 000 000 – Major stratigraphic units, metamorphism and tectonic evolution. Special paper 60. GSF, 2017. P. 41–76.

Slabunov A. I. Archean and Paleoproterozoic orogens of the Fennoscandian Shield and geodynamics of the early Earth. Fundamental problems of tectonics and geodynamics. Vol. 2. Proceedings LII Tectonic meeting. Moscow: GEOS; 2020. P. 299–302. (In Russ.)

Slabunov A. I., Balagansky V. V., Shchipansky A. A. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield, and the tectonic setting of eclogites. Russian Geology and Geophysics. 2021;62(5):525–546. doi: 10.2113/RGG20204266 (In Russ.)

Slabunov A. I., Sharov N. V., Isanina E. et al. Seis-motomographic model of crust on the GSZ profile – OGT 'Land-Sea' the Kalevala-Kem-Gorlo of the White Sea. Structure and history of the lithosphere development. Russian researches on the MPG 2007/2008 program. Vol. 4. Moscow: Paulsen; 2010. P. 291–308. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Слабунов Александр Иванович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник,  
руководитель лаборатории геологии и геодинамики  
декабря

e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

## CONTRIBUTOR:

### Slabunov, Alexander

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Head of Precambrian  
Geology and Geodynamics Laboratory

УДК 551.24 (470.22)(084.3)

## НОВАЯ ТЕКТОНИЧЕСКАЯ КАРТА КАРЕЛИИ: ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ

**А. И. Слабунов\***, **С. А. Светов**, **А. В. Степанова**,  
**П. В. Медведев**, **А. К. Полин**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),  
\*slabunov@krc.karelia.ru*

Тектоническая карта – это картографическое отображение моделей строения (архитектуры) земной коры, а также геодинамических обстановок формирования слагающих их вещественных комплексов. Подготовлена новая тектоническая карта Карелии, которая позволяет: выделять территории с различной историей развития земной коры; проводить анализ эволюции геодинамических обстановок при формировании земной коры региона от архея до палеозоя.

Ключевые слова: тектоническая карта; Карельский кратон; Беломорская провинция; Свеккофеннская провинция; архей; протерозой

Для цитирования: Слабунов А. И., Светов С. А., Степанова А. В., Медведев П. В., Полин А. К. Новая тектоническая карта Карелии: принципы построения и их реализация // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 132–138. doi: 10.17076/geo1690

Финансирование. Работа является вкладом в исследования ИГ КарНЦ РАН по теме АААА-А18-118020290085-4.

### **A. I. Slabunov\*, S. A. Svetov, A. V. Stepanova, P. V. Medvedev, A. K. Polin. A NEW TECTONIC MAP OF KARELIA: THE MAIN CONCEPT AND ITS APPLICATION**

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*slabunov@krc.karelia.ru*

A tectonic map depicts the structure (architecture) of the Earth's crust and the geodynamic settings for the formation of its constituent plutonic and supracrustal complexes. The newly compiled tectonic map of Karelia permits 1) to delineate areas that differ in the evolution of Earth's crust and 2) to analyze the evolution of the geodynamic settings for the formation of Earth's crust from the Archean to the Paleozoic time.

Keywords: tectonic map; Karelian Craton; Belomorian Province; Svecofennian Province; Archean; Paleoproterozoic

For citation: Slabunov A. I., Svetov S. A., Stepanova A. V., Medvedev P. V., Polin A. K. A new tectonic map of Karelia: the main concept and its application. *Trudy Karel'skogo*

Funding. The study is a contribution to the activities of the Institute of Geology KarRC RAS within state-ordered research theme AAAA-A18-118020290085-4.

Тектоническая карта – это картографическое отображение моделей строения (архитектуры) земной коры, а также геодинамических обстановок формирования слагающих их вещественных комплексов [Тектонический..., 2016].

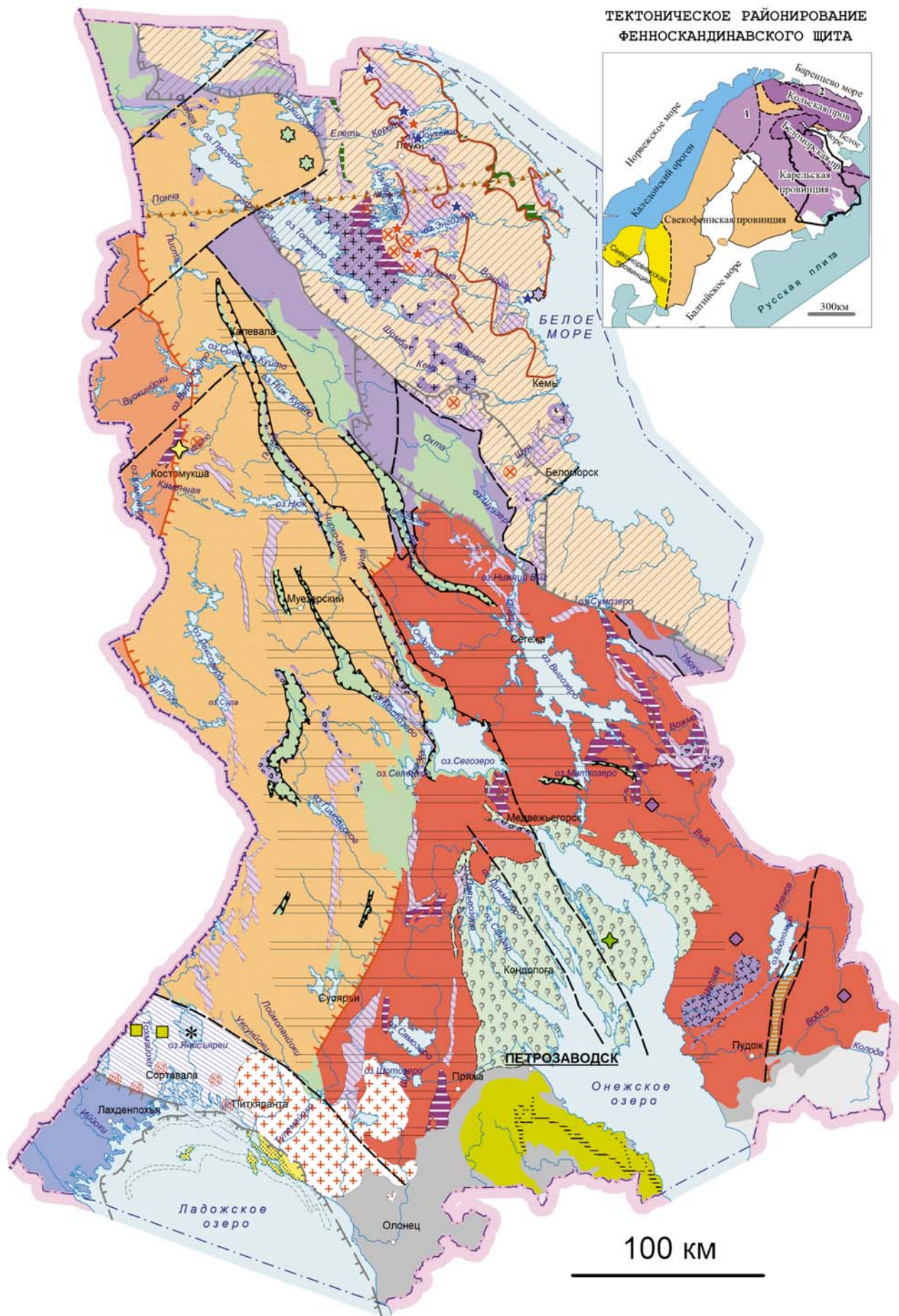
Тектонические карты являются обязательным элементом комплекта геологической информации о территории, поэтому работы по их созданию для территории Карелии были начаты в 30-е годы двадцатого века и получили развитие в эпоху грандиозных геологических исследований в его середине [например, Геология..., 1960]. Наиболее известные тектонические карты Карелии подготовлены в конце двадцатого века и базировались на принципах выделения тектонических ярусов [Лазарев, 1989; Сыстра, 1991]. Эти карты, помимо тектонического районирования, содержат информацию, позволяющую анализировать структурную эволюцию различных тектонических доменов, что и в настоящее время остается актуальной задачей. Вместе с тем смена геодинамической парадигмы, новые данные о строении и эволюции земной коры в раннем докембрии, появившиеся за последние десятилетия, требуют внедрения этих знаний и результатов в практику, в частности тектонического картографирования. Главная цель данной публикации – рассмотреть базовые принципы, заложенные в легенду новой тектонической карты Карелии, и продемонстрировать их реализацию (рис.).

Территория Республики Карелия находится в северо-западной части Восточно-Европейской платформы (кратона), где на поверхность в виде Фенноскандинавского (Балтийского) щита выходит ее древний фундамент. В южной и северо-восточной частях территории республики выделяются доплитные мезопротерозойские (рифейские) рифтогенные структуры: Ладожский авлакоген и рифтовая система Белого моря (рис.). Южная и юго-восточная часть территории сложена неопротерозойскими (вендскими), девонскими, карбоновыми и пермскими осадочными комплексами Русской плиты.

Фенноскандинавский щит с юга и востока ограничен распространением образований Русской плиты, а на северо-западе – каледонским орогеном (рис., врезка). Фенносканди-

навский щит неоднороден, по особенностям строения и тектонического развития земной коры в его пределах выделяются провинции – крупные фрагменты земной коры, отличные по совокупности признаков от соседних, но без обоснования природы этих отличий. В пределах щита выделяется 8 провинций: Карельская, Мурманская, Норрботтен, Беломорская, Кольская, Свекофеннская и Свеконорвежская (рис., врезка). Более глубокий анализ истории развития этих структур позволяет идентифицировать первые три провинции (Карельскую, Мурманскую и Норрботтен) как архейские кратоны [Слабунов и др., 2006; Слабунов, 2008]. Карельский кратон, самый крупный из них, занимает центральное положение в восточной части Фенноскандинавского щита и большую часть территории Карелии (рис., врезка). К юго-востоку от него располагается Свекофеннская провинция, которая определяется как палеопротерозойский (1,9–1,8 млрд лет) Свекофеннский аккреционный подвижный (орогенный) пояс [Балтыбаев, 2013]. К северо-востоку от Карельского кратона находятся Беломорская и Кольская провинции, земная кора каждой из которых имеет длительную самостоятельную историю формирования в архее, а в палеопротерозое (2,0–1,9 млрд лет) они развивались как элементы Лапландско-Кольского коллизионного орогена [Балаганский, 2002]. Ядро этого орогена сложено гранулитами Лапландского и Умбинского поясов и комплементарными им палеопротерозойскими мигматизированными гранито-гнейсами и супракрустами Терского террейна (они находятся на территории Кольского полуострова в Мурманской области), а его юго-западный форланд представлен образованиями Беломорского подвижного пояса. Таким образом, на территории Карелии доступны для исследований образования Карельского архейского кратона, Беломорского докембрийского подвижного пояса и Свекофеннского палеопротерозойского орогена, каждый из которых рассматривается как самостоятельная тектоническая провинция [Слабунов и др., 2006] (рис., врезка).



Появлению новой тектонической карты Карелии [Слабунов, Полин, 2021] предшествовало создание [Куликов и др., 2017] и апробация на крупнейших научных форумах







Тектоническая карта Карелии (масштаб 1:2 000 000) [Слабунов, Полин, 2021]  
 Tectonic map of Karelia (scale 1:2 000 000) [Slabunov, Polin, 2021]

## СХЕМА ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА




Структура обрамления щита

-  Платформенный чехол, байкалиды и рифты
-  Каледонский ороген




Земная кора Фенноскандинавского щита

-  Палео/мезопротерозойская (1.65-1.5 млрд лет) ювенильная
-  Палеопротерозойская (2.0-1.65 млрд лет) ювенильная
-  Архейская (3.0-2.5 млрд лет) с фрагментами ювенильной палеопротерозойской коры, преобразованная в ходе палеопротерозойской орогении (Беломорская и Кольская провинции)
-  Архейская (3.5-2.5 млрд лет) кора (Карельская, Норрботтен (1) и Мурманская (2) провинции)




### ЛЕГЕНДА ТЕКТОНИЧЕСКОЙ КАРТЫ КАРЕЛИИ

-  Чехол Русской плиты Восточно-Европейской платформы: а - палеозой, б - венд
-  Южная граница Кольской девонской (400-360 млн лет) крупной магматической провинции мантийно-плюмовой природы
-  Неопротерозойская (725 млн лет) астроблема








### МЕЗО-НЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ РИФТОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ МАНТИЙНО-ПЛЮМОВОЙ ПРИРОДЫ

-  Рифейские (1.5-1.1 млрд лет) континентальные рифты
-  Рифейские магматические образования мантийно-плюмовой природы: а - силлы габбродолеритов, монцонитов; б - лампроиты, кимберлиты
-  Мезопротерозойские (1.66-1.53 млрд лет) анорогенные интрузии (граниты рапакиви)






### ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ (2.0-1.65 млрд лет) ОРОГЕНЫ

-  Ювенильная кора Свеккофеннского (1.98-1.65 млрд лет) аккреционного орогена
-  Форланд Свеккофеннского аккреционного орогена
-  Форланд Лапландско-Кольского (2.0-1.9 млрд лет) коллизионного орогена





### ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ РИФТОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ МАНТИЙНО-ПЛЮМОВОЙ ПРИРОДЫ

-  Вепсийский (1.8-1.75 млрд лет) внутриплитный бассейн
-  Магматические образования мантийно-плюмовой природы: а - силлы габбродолеритов; б - бимодальный интрузивный комплекс
-  Ятулийско-людиковый (2.3-1.96 млрд лет) внутриплитный бассейн
-  Предполагаемая область распространения бассейна
-  Центральная часть бассейна с проявлениями мантийно-плюмового магматизма
-  Реликты бассейна с проявлениями мантийно-плюмового магматизма
-  Магматические образования мантийно-плюмовой природы: а - щелочные интрузии; б - кимберлиты





Сумийский (2.5-2.4 млрд лет) континентальный рифт "Ветренный пояс"

-  Центральная часть рифта
-  Второстепенные рифтогенные структуры
-  Интрузии мантийно-плюмовой природы:
-  Гранитоиды (а) и габброиды (б) бимодального комплекса
-  Карбонатиты

### АРХЕЙСКИЕ ТЕРРЕЙНЫ

-  Центрально-Карельский: неoarхейская континентальная кора с реликтами мезoarхейской
-  Беломорский: мезо-неoarхейская континентальная кора, претерпевшая структурно-метаморфические преобразования в ходе лапландско-кольской орогении
-  Западно-Карельский (Кианта): мезо-неoarхейская континентальная кора
-  Водлозерский: мезо-неoarхейская континентальная кора с реликтами (показаны ромбами) палеoarхейской






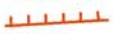

### ИНДИКАТОРЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК АРХЕЯ (3.05-2.7 млрд лет)

-  Офиолитовые комплексы (маркируют спрединг и другие процессы формирования океанической коры)
-  Субдукционные комплексы (островодужные вулканы, осадочные комплексы задуговых и преддуговых бассейнов, эколгитсодержащий меланж)
-  Коллизионные комплексы: а - метаморфические ассоциации высокобарической гранулитовой фации; б - коллизионные граниты
-  Мантийно-плюмовые комплексы: а - океанические плато; б - внутриплитные рифты

### ГРАНИТО-ГНЕЙСОВЫЕ КУПОЛА — ПРОЯВЛЕНИЕ ДИАПИРОВОЙ ТЕКТОНИКИ

-  Палеопротерозойские
-  Неoarхейские

### РАЗЛОМЫ

-  Сбросы, ограничивающие рифейские рифты
-  Надвиги, связанные с палеопротерозойскими процессами коллизии и аккреции
-  Сбросы, ограничивающие ятулийские грабен-синклинали
-  Надвиги, связанные с неoarхейскими процессами:
-  а) коллизии (Беломорская провинция)
-  б) аккреции (Карельский кратон)
-  Разломы, не классифицированные по возрасту, морфологии и кинематике

[Куликов и др., 2015; Slabunov et al., 2016; Svetov et al., 2016] обзорной геологической карты Юго-Восточной Фенноскандии масштаба 1:750 000. Эта карта содержит базовую информацию об основных геологических комплексах территории Карелии и является основой для тектонического районирования и геодинамической интерпретации геологических образований.

Тектоническое районирование докембрийских образований проведено по принципу истории становления континентальной земной коры. Этот подход подразумевает анализ истории формирования блоков земной коры и выделение в их составе террейнов – фрагментов, которые отличаются от соседних историей своего формирования и отделены от них разломами. В архее в пределах Карелии выделено четыре террейна: Водлозерский, Западно-Карельский, Центральнo-Карельский и Беломорский (рис.). Они различаются временем начала формирования континентальной коры, особенностями истории ее развития в архее [Слабунов и др., 2006]. Среди палеопротерозойских структур выделяются отдельные элементы орогенных поясов (форланд коллизионного Лапландско-Кольского; форланд и небольшой фрагмент ювенильной земной коры аккреционного Свекофеннского), рифтогенные системы, связанные с воздействием на земную кору мантийных плюмов. Среди последних выделяются сумийский континентальный рифт Ветреный пояс, ятулийско-людиковийский и вепсийский внутриплитные бассейны, рифейская система континентальных рифтов.

На карте содержится информация о проявлениях в архее и протерозое дизъюнктивной и диапировой тектоники (рис.). Среди первых выделяются разломы различной природы (надвиги, сбросы и др.), а среди вторых – гранито-гнейсовые купола.

В легенде помимо возраста стабилизации коры важное значение уделено идентификации комплексов – индикаторов геодинамических обстановок. К ним относятся: офиолиты – индикаторы спрединга и процессов становления океанической коры (в том числе в супрасубдукционных обстановках); островодужные вулканы, осадочные комплексы задуговых и преддуговых бассейнов, эклогитсодержащий меланж – рассматриваемые как индикаторы субдукционных обстановок; метаморфические комплексы высокобарической гранулитовой фации, граниты S-типа, надвиги, гранито-гнейсовые купола – индикаторы коллизионных обстановок; бимодальный, коматиитовый, щелочной, кимберлитовый магматизм, осадочные

бассейны с проявлениями этого магматизма – индикаторы подъема мантийных плюмов и их взаимодействия с континентальной литосферой. Показана также астроблема, как проявление взаимодействия земной коры с небесными телами.

Таким образом, новая тектоническая карта Карелии наряду с информацией о тектоническом районировании территории содержит большой пласт данных о геодинамических аспектах формирования земной коры региона от архея до палеозоя и позволяет: 1) выделять территории с различной историей становления земной коры; 2) проводить геодинамические реконструкции для разных временных срезов от архея до палеозоя. Эти данные могут быть полезны для оценки металлогенической специализации отдельных структур и районов.

## Литература

*Балаганский В. В.* Главные этапы тектонического развития северо-востока Балтийского щита в палеопротерозое: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. СПб.: СПбГПУ, 2002. 32 с.

*Балтыбаев Ш. К.* Свекофеннский ороген Фенноскандинавского щита: вещественно-изотопная зональность и ее тектоническая интерпретация // Геотектоника. 2013. № 6. С. 44–59.

*Геология СССР. Т. 37. Карельская АССР / Ред. Антропов П. Я., Волотовская Н. А., Кратц К. О., Нумерова В. Н. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 740 с.*

*Куликов В. С., Володичев О. И., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Куликова В. В., Светов С. А., Слабунов А. И., Гоголев М. А., Полин А. К.* Магматические и метаморфические формации и комплексы на новой геологической карте ЮВ Фенноскандии м-ба 1:750 000 // Петрография магматических и метаморфических горных пород: Мат-лы XII Всерос. петрограф. совещания. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 444–446.

*Куликов В. С., Светов С. А., Слабунов А. И., Куликова В. В., Полин А. К., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Гоголев М. А.* Геологическая карта Юго-Восточной Фенноскандии масштаба 1:750 000: новые подходы к составлению // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 2. С. 3–41. doi: 10.17076/geo444

*Лазарев Ю. И.* Тектоническая карта // Атлас Карельской АССР. М.: ГУГК при СМ СССР, 1989. С. 11.

*Слабунов А. И., Полин А. К.* Тектоническая карта // Атлас Республики Карелия / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 14–15.

*Слабунов А. И.* Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.

*Слабунов А. И., Балаганский В. В., Щипанский А. А.* Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция



эколитов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 648–675. doi: 10.15372/GiG2021116

Слабунов А. И., Лобач-Жученко С. Б., Бибикова Е. В., Балаганский В. В., Сорьонен-Вард П., Володичев О. И., Щипанский А. А., Светов С. А., Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Степанов В. С. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки // Геотектоника. 2006. № 6. С. 3–32.

Сыстра Ю. Й. Тектоника карельского региона. Л.: Наука, 1991. 176 с.

Тектонический кодекс России / Отв. ред. Мержеловский Н. В. М.: Геокарта-ГЕОС, 2016. 240 с.

Slabunov A. I., Svetov S. A., Kulikov V. S., Polin A. K. A new geological map of the SE Fennoscandian Shield as a tool for the Early Precambrian crustal evolution study (exemplified by the Archean) // Lithosphere 2016. Ninth Symposium on structure, composition and evolution of the lithosphere in Fennoscandia. Programme and Extended abstracts. Institute of Seismology, University of Helsinki. Finland. Report S-65. 2016. P. 131–134.

Svetov S. A., Slabunov A. I., Kulikov V. S. A new geological map of the SE Fennoscandian Shield as a basis for the study of the evolution of the early earth crust // 35th International Geological Congress, Cape Town, South Africa. Abstracts. Alexandria: American Geosciences Institute, 2016. P. 3935.

## References

Antropov P. Ya., Volotovskaya N. A., Kratts K. O., Numerova V. N. (eds.). Geology of the USSR. Vol. 37. Karelian ASSR. Moscow: Gosgeoltekhizdat; 1960. 740 p. (In Russ.)

Balagansky V. V. Main stages of the Palaeoproterozoic tectonic evolution of the Northeastern Baltic Shield: DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg; 2002. 32 p. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K. Svecofennian Orogen of the Fennoscandian Shield: Compositional and isotopic zoning and its tectonic interpretation. *Geotectonics*. 2013;47(6): 452–464. doi: 10.1134/S0016852113060022

Kulikov V. S., Volodichev O. I., Golubev A. I., Gor'kovets V. Ya., Ivashchenko V. I., Kulikova V. V., Svetov S. A., Slabunov A. I., Gogolev M. A., Polin A. K. Magmatic and metamorphic formations and complexes on a new geological map of the southeastern Fennoscandia (scale 1:750 000). *Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh gornyx porod: materialy XII Vseros. petrograf. soveshchaniya = Petrography of Magmatic*

*and Metamorphic Rocks: Proceed. of the XII All-Russian Petrographic Conf.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 444–446. (In Russ.)

Kulikov V. S., Svetov S. A., Slabunov A. I., Kulikova V. V., Polin A. K., Golubev A. I., Gor'kovets V. Ya., Ivashchenko V. I., Gogolev M. A. Geological map of Southeastern Fennoscandia (scale 1:750 000): A new approach to map compilation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2017;2:3–41. (In Russ.)

Lazarev Yu. I. Tectonic map. *Atlas of Karelian ASSR*. Moscow: GUGK; 1989. (In Russ.)

Mezhelovsky N. V. (ed.). Tectonic code of Russia. Moscow: Geokart-GEOS; 2016. 240 p. (In Russ.)

Slabunov A. I., Polin A. K. Tectonic map. *Atlas of Republic of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2021. P. 14–15. (In Russ.)

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of the Archean Mobile Belts (on the example of the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 298 p. (In Russ.)

Slabunov A. I., Balagansky V. V., Shchipansky A. A. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield, and the tectonic setting of eclogites. *Russian Geology and Geophysics*. 2021;62(5):525–546. doi: 10.2113/RGG20204266

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Balagansky V. V., Sorjonen-Ward P., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. The Archean of the Baltic Shield: Geology, geochronology, and geodynamic settings. *Geotectonics*. 2006;40:409–433. doi: 10.1134/S001685210606001X

Slabunov A. I., Svetov S. A., Kulikov V. S., Polin A. K. A new geological map of the SE Fennoscandian Shield as a tool for the Early Precambrian crustal evolution study (exemplified by the Archean). *Lithosphere 2016. Ninth Symposium on structure, composition and evolution of the lithosphere in Fennoscandia*. Programme and Extended abstracts. Institute of Seismology, University of Helsinki. Finland. Report S-65. 2016. P. 131–134.

Svetov S. A., Slabunov A. I., Kulikov V. S. A new geological map of the SE Fennoscandian Shield as a basis for the study of the evolution of the early earth crust. *35th International Geological Congress, Cape Town, South Africa*. Abstracts. Alexandria: American Geosciences Institute; 2016. P. 3935.

Systra Yu. I. Tectonics of the Karelian region. Leningrad: Nauka; 1991. 176 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Слабунов Александр Иванович**

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник,  
руководитель лаборатории геологии и геодинамики  
докембрия

e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

## CONTRIBUTORS:

**Slabunov, Alexander**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Head  
of Precambrian Geology and Geodynamics Laboratory

**Светов Сергей Анатольевич**

д-р геол.-мин. наук, директор, руководитель  
лаборатории

*e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru*

**Степанова Александра Владимировна**

канд. геол.-мин. наук, заместитель директора, ведущий  
научный сотрудник

*e-mail: stepanov@krc.karelia.ru*

**Медведев Павел Владимирович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории геологии и геодинамики докембрия

*e-mail: pmedved@krc.karelia.ru*

**Полин Александр Константинович**

канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник

*e-mail: polin@krc.karelia.ru*

**Svetov, Sergey**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Director, Head of Laboratory

**Stepanova, Alexandra**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Deputy Director, Leading  
Researcher

**Medvedev, Pavel**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher,  
Precambrian Geology and Geodynamics Laboratory

**Polin, Alexander**

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher

УДК 553.546 : 551.71 (470.22)

## **ПОЛИХРОННАЯ ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕОАРХЕЙСКИХ ПОЛОСЧАТЫХ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ГЛАВНОЙ РУДНОЙ ТОЛЩИ КОСТОМУКШСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА: ВОЗРАСТ ЦИРКОНОВ И АКЦЕССОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ**

**А. И. Слабунов\***, **А. В. Кервинен**, **Н. С. Нестерова**, **А. В. Егоров**,  
**О. А. Максимов**, **П. В. Медведев**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), \*slabunov@krc.karelia.ru*

В полосчатых железистых кварцитах (BIF) неоархейской (2,76–2,74 млрд лет) костомукшской свиты Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона установлены следующие акцессорные минералы: циркон, апатит, монацит, барит. Цирконы из BIF содержат магматогенные ядра с возрастными 2,9–2,8 млрд лет, что указывает на наличие в областях сноса мезоархейских пород. Метаморфогенные цирконы имеют возрасты 2,73; 2,64 и 1,86 млрд лет и маркируют полиметаморфическую историю формирования.

**Ключевые слова:** полосчатые железистые кварциты; циркон; барит; апатит; монацит; Костомукшский зеленокаменный пояс; Карельский кратон

Для цитирования: Слабунов А. И., Кервинен А. В., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Максимов О. А., Медведев П. В. Полихронная история формирования неоархейских полосчатых железистых кварцитов главной рудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса: возраст цирконов и акцессорные минералы // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 139–143. doi: 10.17076/geo1666

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 22-17-00026).

**A. I. Slabunov\***, **A. V. Kervinen**, **N. S. Nesterova**, **A. V. Egorov**, **O. A. Maksimov**,  
**P. V. Medvedev**. **POLYCHRONOUS EVOLUTION OF NEOARCHEAN BANDED IRON FORMATION IN THE MAIN ORE SEQUENCE OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT: THE AGE OF ZIRCONS AND ACCESSORY MINERALS**

*Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*slabunov@krc.karelia.ru*

The banded iron formation (BIF) of the Neoarchean (2.76–2.74 Ga) Kostomuksha Formation of the Kostomuksha Greenstone Belt of the Karelian Craton was shown to contain the following accessory minerals: zircon, apatite, monazite and barite.

Zircons from BIF have 2.9–2.8 Ga magmatic cores indicating the presence of Mesoproterozoic rocks in source areas. Metamorphic zircons were dated at 2.73, 2.64 and 1.86 Ga. They mark the polymetamorphic evolution.

Keywords: banded iron formation; zircon; barite; apatite; monazite; Kostomuksha Greenstone Belt; Karelian Craton

For citation: Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Egorov A. V., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Polychronous evolution of Neoproterozoic banded iron formation in the main ore sequence of the Kostomuksha Greenstone Belt: the age of zircons and accessory minerals. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:139–143. doi: 10.17076/geo1666

Funding. The study is funded by Russian Science Foundation grant 22-17-00026.

Полосчатые железистые кварциты (banded iron formation, BIF) являются особым типом метаморфизованных осадочных пород, формирование которых происходило только в докембрии [Bekker et al., 2010]. Они часто входят в состав зеленокаменных комплексов и иногда формируют крупные залежи, являющиеся рудой. Так, полосчатые железистые кварциты костомукшской свиты гимольской серии Костомукшского зеленокаменного пояса, расположенного в центральной части Карельского кратона, формируют крупнейшее на северо-западе России месторождение железных руд. Данная статья посвящена рассмотрению первых результатов изучения акцессорных минералов, в том числе цирконов, выделенных из BIF главной железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса, что позволяет более корректно восстановить историю становления рудной толщи.

Карельский кратон относится к числу классических структур этого типа и сложен преимущественно архейскими гранитоидами и зеленокаменными (в меньшей степени парагенетическими) комплексами [Slabunov et al., 2006; Куликов и др., 2017]. Последние формируют зеленокаменные пояса и представляют собой относительно узкие линейные структуры, окруженные гранитоидами. Зеленокаменные комплексы – это совокупность, как правило, относительно слабо или умеренно метаморфизованных вулканогенных и осадочных (в том числе BIF) пород.

Костомукшский зеленокаменный пояс входит в состав террейна Кианта Западно-Карельской субпровинции Карельского кратона [Slabunov et al., 2006]. Он представляет собой относительно небольшую субмеридиональную удлиненную структуру (по простиранию прослеживается на 25 км при ширине 4,5–7 км), погружающуюся в целом на восток, и прослеживается на глубину до 6,5 км [Самсонов и др.,

2001; Кожевников и др., 2006; Горьковец, Шаров, 2015].

Гимольская серия слагает восточный борт зеленокаменного пояса и представлена метаморфизованными песчано-глинистыми осадками флишевого типа. В основании толщи выделяются конгломераты (суккозерская свита), в нижней части толщи велика доля BIF (костомукшская свита), а в верхней резко преобладают безрудные граувакки (сурлампинская свита). Формирование железорудной осадочной толщи (гимольской серии) в Костомукшском зеленокаменном поясе происходило синхронно с кислым вулканизмом, возраст которого оценивается в 2,76–2,74 млрд лет [Слабунов и др., 2021], в субдукционной геодинамической обстановке [Slabunov et al., 2020 и ссылки в ней].

Железорудная толща (костомукшская свита гимольской серии), изученная авторами в Центральном и Корпангском карьерах Костомукшского месторождения, сечется неархейскими ( $2707 \pm 31$  и  $2675 \pm 9$  млн лет соответственно) гранит-порфирами и гранитами (шурловарский массив).

Гранитоиды тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации из обрамления пояса не являются фундаментом для зеленокаменного комплекса, так как их возраст оценивается в  $2779 \pm 11$  млн лет [Бибикова и др., 2005], т. е. они моложе вулканитов контоксской серии. Вместе с тем эти ТТГ древнее осадков железорудной толщи (гимольской серии). Кроме того, в районе установлены гранитоиды, которые секут зеленокаменный комплекс. Это граниты Ниемиярвинского массива ( $2720 \pm 20$  млн лет) и санукитоиды массивов Таловейс ( $2718 \pm 6$  –  $2707 \pm 9$  млн лет) [Бибикова и др., 2005].

Гранит-зеленокаменный комплекс рассматриваемого района сечется палеопротерозойскими (с возрастом около 2,4 млрд лет) дайка-

ми долеритов. Наиболее позднее проявление эндогенной активности здесь – неопротерозойский (около 1,2 млрд лет) щелочно-ультраосновной магматизм (лампроиты, кимберлиты) [Горьковец, Шаров, 2015].

### Акцессорные минералы

Среди акцессорных минералов в BIF костомукшской свиты установлены монацит, барит, апатит (рис. 1) и цирконы (рис. 2).

Монацит образует мелкие (15–20 мкм) хорошо ограненные зерна (рис. 1, а, б), не имеет признаков окатанности и является метаморфогенным. Его химический состав отвечает фтор-apatиту.

Барит встречается как в виде небольших призматических зерен (рис. 1, а), концентрирующихся в прослоях кварца, так и в виде аме-

бовидных агрегатов среди зерен магнетита (рис. 1, в). Он, по-видимому, также образуется в ходе метаморфических преобразований под влиянием, например, неоархейских гранитоидов.

Апатит образует как относительно крупные (до 300 мкм) зерна в породе, так и минеральные включения в цирконах. Формирование апатита может быть связано с влиянием на BIF кислого магматизма, несколько генераций которого, как было показано выше, проявлено в Костомукшской структуре.

Среди акцессорных минералов в рассматриваемых BIF установлен и циркон. Его призматические слабоудлиненные зерна размером 50–150 мкм нередко имеют ядра, отличающиеся от каем внутренним строением (рис. 2). В цирконах отмечены минеральные включения апатита, монацита, торита, калиевого полевого шпата.

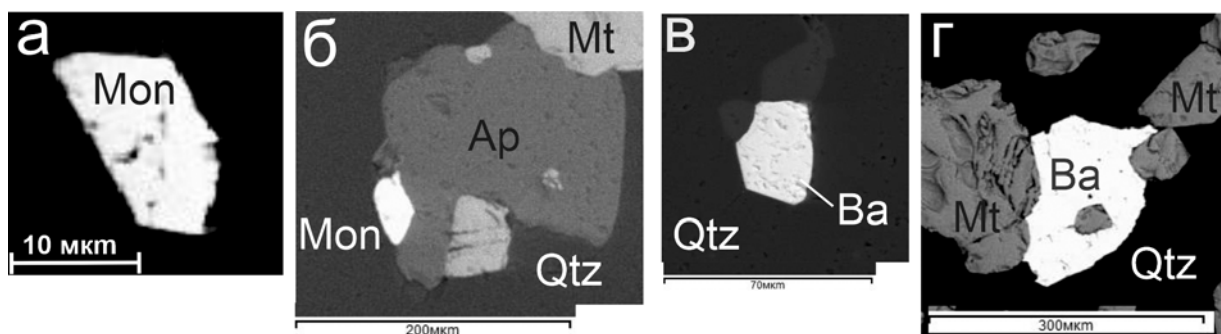


Рис. 1. Изображения в отраженных электронах минеральных ассоциаций BIF с монацитом (а, б), апатитом (б) и баритом (в, г):

Ap – апатит, Ba – барит, Qtz – кварц, Mon – монацит, Mt – магнетит

Fig. 1. Back-scatter electron images of mineral BIF associations with monazite (a, б), apatite (б) and barite (в, г): Ap – apatite, Ba – barite, Qtz – quartz, Mon – monazite, Mt – magnetite

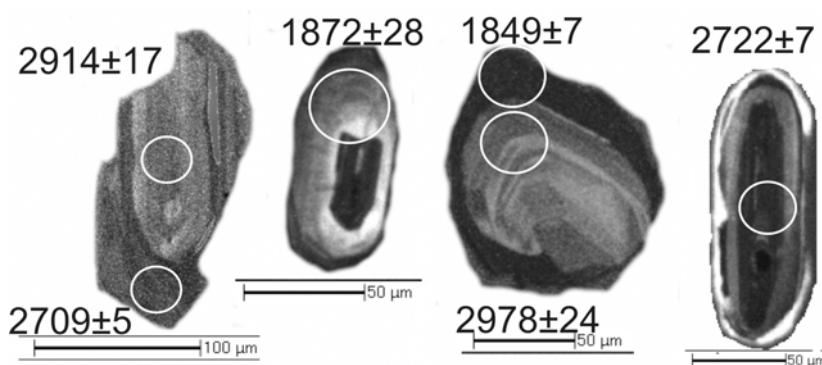


Рис. 2. Катодолюминесцентные изображения цирконов из BIF Костомукшской свиты. Белые окружности – аналитические точки, цифры – значения  $^{207}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}$  возраста в них (в млн лет)

Fig. 2. Cathodoluminescence images of zircon from the Kostomuksha Formation BIF. White circle – analytical points, numbers –  $^{207}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}$  ages (in Ma) in them are shown

Изученные цирконы часто содержат ядра (рис. 2), среди которых выделяется два типа: с тонкой осцилляторной зональностью, характерной для магматогенных цирконов и  $^{207}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}$  возрастaми 3,0 и 2,8 млрд лет (рис. 2), а также однородные черные на CL-изображениях с возрастом около 2,7 млрд лет (рис. 2). По предварительным данным, возраст большей части зерен цирконов и ранней генерации каем оценивается в 2730 млн лет. Кроме того, в цирконах из BIF Корпангского карьера выделяется генерация с возрастом 2640 млн лет, а Центрального – 2100 и 1860 млн лет.

С учетом того, что возраст толщи граувакк, с которыми чередуются BIF, оценивается в 2,76–2,74 млрд лет [Слабунов и др., 2021], мезоархейские цирконы из BIF – это фрагменты пород из области сноса, а цирконы с возрастaми 2,73; 2,64 и 1,86 млрд лет имеют метаморфогенную природу и маркируют главные стадии преобразования BIF.

## Главные выводы

1. В составе неархейской (2,76–2,74 млрд лет) костомукшской свиты гимольской серии в чередовании с граувакками и в ассоциации с кислыми вулканитами находятся BIF, содержащие акцессорные минералы: циркон, апатит, монацит, барит.

2. Цирконы из BIF содержат магматогенные ядра с возрастaми 2,9–2,8 млрд лет, что указывает на наличие в областях сноса мезоархейских пород. Метаморфогенные цирконы имеют возрастa 2,73; 2,64 и 1,86 млрд лет и маркируют полиметаморфическую историю формирования BIF.

## Литература

Бибикова Е. В., Самсонов А. В., Петрова А. Ю., Кирнозова Т. И. Геохронология архея Западной Карелии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2005. Т. 13(5). С. 3–20.

Горьковец В. Я., Шаров Н. В. (ред.) Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минералогия). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 322 с.

Кожевников В. Н., Бережная Н. Г., Пресняков С. Л., Лепехина Е. Н., Антонов А. В., Сергеев С. А. Геохронология циркона (SHRIMP-II) из архейских стратотектонических ассоциаций в зеленокаменных поясах Карельского кратона: роль в стратиграфических и геодинамических реконструкциях // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т. 14(3). С. 19–41.

Самсонов А. В., Берзин Р. Г., Заможная Н. Г., Щипанский А. А., Бибикова Е. В., Кирнозова Т. И., Конилов А. Н. Процессы формирования раннедо-

кембрийской коры Северо-Западной Карелии, Балтийский щит: результаты геологических, петрологических и глубинных сейсмических (профиль 4В) исследований // Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь – Калевала. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 109–143.

Куликов В. С., Светов С. А., Слабунов А. И., Куликова В. В., Полин А. К., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Гоголев М. А. Геологическая карта Юго-Восточной Фенноскандии масштаба 1:750 000: новые подходы к составлению // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 2. С. 3–41. doi: 10.17076/geo444

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Кулешевич Л. В., Кевлич В. И. Геохимия, геохронология цирконов и возраст архейской железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита // Геохимия. 2021. Т. 66(4). С. 291–307. doi: 10.31857/S0016752521040063

Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapez B., Hofmann A., Konhauser K. O., Rouxel O. J. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes // *Economic Geology*. 2010. Vol. 105. P. 467–508.

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Sorjonen-Ward P., Balagansky V. V., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. The Archean nucleus of the Fennoscandian (Baltic) Shield // *European Lithosphere Dynamics*. London, 2006. P. 627–644. doi: 10.1144/GSL.MEM.2006.035.01.37

Slabunov A. I., Egorov A. V., Nesterova N. S. Geochemical types of Archean banded iron formations and the geodynamic settings of the basins, Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Russia // *Proceedings 4th Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting 2020. Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources*. Kazan, 2020. P. 256–261. doi: 10.26352/E922\_KAZAN2020

## References

Bekker A., Slack J. F., Planavsky N., Krapez B., Hofmann A., Konhauser K. O., Rouxel O. J. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology*. 2010;105:467–508.

Bibikova E. V., Samsonov A. V., Petrova A. Yu., Kirnozova T. I. The Archean geochronology of western Karelia. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2005;13(5):459–475.

Gorkovets V. Ya., Sharov N. V. (Eds.) Kostomuksha ore district: Geology, deep structure, and metallogeny. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 322 p. (In Russ.)

Kozhevnikov V. N., Berezhnaya N. G., Presnyakov S. L., Lepekhina E. N., Antonov A. V., Sergeev S. A. Geochronology (SHRIMP II) of zircons from Archean stratotectonic associations of Karelian Greenstone Belts: Significance for stratigraphic and geodynamic reconstructions. *Stratigraphy and geological correlation*. 2006;14(3):240–259.

Kulikov V. S., Svetov S. A., Slabunov A. I., Kulikova V. V., Polin A. K., Golubev A. I., Gorkovets V. Ya., Ivashchenko V. I., Gogolev M. A. Geological map of South-eastern Fennoscandia (scale 1:750 000): A new approach to map compilation. *Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2017;2:3–41. doi: 10.17076/geo444 (In Russ.)

Samsonov A. V., Berzin R. G., Zamozhnyaya N. G., Shchipansky A. A., Bibikova E. V., Kirnozova T. I., Konilov A. N. Processes of formation of the Early Precambrian Crust of Northwestern Karelia, Baltic Shield: results of geological, petrological, and deep seismic (profile 4B) studies. *Deep structure and crustal evolution of the Eastern Fennoscandian Shield: Kem–Kalevala Profile*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. P. 109–143. (In Russ.)

Slabunov A. I., Egorov A. V., Nesterova N. S. Geochemical types of Archean banded iron formations and the geodynamic settings of the basins, Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Russia. *Proceedings 4<sup>th</sup> Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting 2020. Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources*. Kazan; 2020. P. 256–261. doi: 10.26352/E922\_KAZAN2020

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Sorjonen-Ward P., Balagansky V. V., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. The Archean nucleus of the Fennoscandian (Baltic) Shield. *European Lithosphere Dynamics*. London; 2006. P. 627–644. doi: 10.1144/GSL.MEM.2006.035.01.37

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Egorov A. V., Kuleshevich L. V., Kevlich V. I. Age of the Archean strata with banded iron formation in the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield: Constraints on the geochemistry and geochronology of zircons. *Geochemistry International*. 2021;59(4):341–356. doi: 10.1134/S0016702921040066

Поступила в редакцию / received: 21.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Слабунов Александр Иванович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

### Кервинен Анна Валерьевна

младший научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: kervinen@mail.ru

### Нестерова Наталья Сергеевна

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: nesterovan@krc.karelia.ru

### Егоров Александр Викторович

младший научный сотрудник лаб. геологии и геодинамики докембрия

e-mail: av.egorov1@kostomuksha.ru

### Максимов Олег Александрович

научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: olemaximov@mail.ru

### Медведев Павел Владимирович

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: pmedved@krc.karelia.ru

## CONTRIBUTORS:

### Slabunov, Alexander

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Head of Laboratory

### Kervinen, Anna

Junior Researcher

### Nesterova, Natalia

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

### Egorov, Alexander

Junior Researcher

### Maksimov, Oleg

Researcher

### Medvedev, Pavel

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

УДК 552.163

## ЭТАПЫ И ВОЗРАСТ МЕТАМОРФИЗМА В ПОРОДАХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КИТОЙСКОГО БЛОКА (ШАРЫЖАЛГАЙСКИЙ ВЫСТУП СИБИРСКОГО КРАТОНА)

В. П. Сухоруков<sup>1\*</sup>, В. Б. Савельева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии СО РАН (пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090), \*svp@igm.nsc.ru

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН (ул. Лермонтова, 128, Иркутск, Россия, 664033)

Проведено изучение глиноземистых гнейсов и гранатовых амфиболитов восточной части Китойского блока Шарыжалгайского выступа (район Китойского силлиманитового месторождения). На основании петрографического изучения микроструктурных взаимоотношений минералов, их химической неоднородности, оценок РТ-параметров метаморфизма и термодинамического моделирования установлено, что оба типа пород подверглись двухэтапному метаморфизму. Первый эпизод регионального метаморфизма характеризовался пиковыми параметрами  $T = 780\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P = 8\text{--}9\text{ кбар}$  и завершился снижением давления на регрессивной стадии. Второй этап метаморфизма протекал при низких давлениях 2–4 кбар и в широком интервале температур от 650–700 до 850 °С. На основании датирования циркона и монацита из гранат-антофиллитовых гнейсов был установлен возраст метаморфизма в интервале 2489–2496 и 2446–2456 млн лет, что совпадает с возрастом гранитоидного магматизма.

Ключевые слова: Сибирский кратон; Китойский блок; гранулитовый метаморфизм; неоархей

Для цитирования: Сухоруков В. П., Савельева В. Б. Этапы и возраст метаморфизма в породах восточной части Китойского блока (Шарыжалгайский выступ Сибирского кратона) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 144–147. doi: 10.17076/geo1652

Финансирование. Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## V. P. Sukhorukov<sup>1\*</sup>, V. B. Savel'eva<sup>2</sup>. STAGES AND AGE OF METAMORPHISM OF THE EASTERN PART OF KITOY BLOCK (SHARYZHALGAI UPLIFT, SIBERIAN CRATON)

<sup>1</sup> Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia), \*svp@igm.nsc.ru

<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (128 Lermontova St., 664033 Irkutsk, Russia)



Alumina gneisses and garnet amphibolites of the eastern part of the Kitoy block of Sharyzhalgai Uplift (Kitoy sillinite deposit area) were studied. On the basis of petrographic studies of mineral microstructures, chemical zoning, PT-estimates and thermodynamical modeling two stages of metamorphism were found in both rock types. The first episode of regional metamorphism (M1) occurred at  $T = 780\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $P = 8\text{--}9\text{ kbar}$  and was followed by decompression in the retrograde stage. The second stage (M2) occurred at low pressure,  $P = 2\text{--}4\text{ kbar}$ , and in a wide temperature interval of  $T = 650\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Two peaks were established on the basis of U-Pb monazite and zircon dating in garnet-anthophyllite gneisses. Both of them correspond to Neoproterozoic age: the age of M1 falls into the interval of ca. 2489–2496 Ma, the age of M2 – ca. 2446–2456 Ma. The high-temperature metamorphism of the Kitoy block and nearly coeval granitoid magmatism can be regarded as evidence for a Neoproterozoic collision in the SW Siberian Craton.

Keywords: Siberian Craton; Kitoy block; granulite metamorphism; Neoproterozoic

For citation: Sukhorukov V. P., Savel'eva V. B. Stages and age of metamorphism of the eastern part of the Kitoy Block (Sharyzhalgai Uplift, Siberian Craton). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:144–147. doi: 10.17076/geo1652

Funding. The study was carried out under state assignment to the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS with support from the Russian Ministry for Science and Higher Education.

Китойский и Иркутский гранулитогнейсовые блоки образуют большую часть Шарышалгайского выступа Сибирской платформы, они сложены однотипными породными ассоциациями, в обоих блоках для метаматических пород по циркону установлены два этапа гранулитового метаморфизма: 2,55–2,60 и 1,85–1,86 млрд лет, которые коррелируют с образованием гранитоидов (2,53–2,54 и 1,85–1,86 млрд лет) [Гладкочуб и др., 2005; Turkina et al., 2012 и др.].

Китойское силлиманитовое месторождение располагается в восточной части Китойского блока, вблизи его границы с Иркутским блоком. Район месторождения сложен силлиманитовыми, андалузит-силлиманитовыми, гранат-силлиманитовыми сланцами и гнейсами, которые переслаиваются с кварцитами, амфиболитами, мраморами. Толщи силлиманитосодержащих сланцев подстилаются амфиболитами и амфиболовыми гнейсами, которые содержат пачки высокоглиноземистых сланцев, отдельные прослои биотитовых и биотит-гранатовых гнейсов.

Минеральные ассоциации гранатовых амфиболитов  $\text{Grt} + \text{Hbl} + \text{Pl} + \text{Qz} \pm \text{Cpx}$ . В них установлено два типа реакционных микроструктур: 1) плагиоклаз-роговообманковые каймы вокруг граната и 2) формирование мелкозернистого агрегата  $\text{Cpx} + \text{Orx} + \text{Pl}$  по более крупным зернам роговой обманки. Первый тип структур проявлен во всех образцах, второй – только в части. Плагиоклаз в реакционных каймах име-

ет более высокую основность, чем в матрице породы, амфибол характеризуется более низким содержанием Na, Ti, Al (IV). Оценка PT-параметров пика метаморфизма проводилась по минералам матрикса и ассоциации  $\text{Grt} + \text{Hbl} + \text{Pl} + \text{Qz}$ , полученные параметры отвечают  $T = 710\text{--}770\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 8\text{--}9\text{ kbar}$ . Для регрессивного этапа по составам минералов каем  $\text{Hbl} + \text{Pl}$  получены значения  $T$  около  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  при существенно более низких давлениях 1,3–2,5 кбар. Замещение роговой обманки мелкозернистым агрегатом с двупироксеновой ассоциацией происходило, вероятно, при температурах гранулитовой фации метаморфизма – около  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  [Sukhorukov, Savel'eva, 2020].

Глиноземистые гнейсы представлены двумя типами: гранат-силлиманитовые с ассоциацией  $\text{Grt} + \text{Crd} + \text{Sill} + \text{Bt} + \text{Pl} + \text{Qz}$  и гранат-антофиллитовые с ассоциацией  $\text{Grt} + \text{Bt} + \text{Crd} + \text{Anth} + \text{Ged} + \text{Orx} + \text{Pl}$ . Обе ассоциации содержат акцессорные рутил, циркон и монацит. Главные реакционные структуры для гранат-силлиманитовых гнейсов включают кордиерит-кварцевые каймы вокруг зерен граната и замещение силлиманитом исходного андалузита, от частичного в одних образцах до полного в других. В кордиеритовых каймах отмечается резорбирование биотита. В гранат-антофиллитовых гнейсах встречаются следующие реакционные структуры: 1) кордиерит-антофиллитовые каймы вокруг граната и биотита; 2) каймы практически чистого анортита с включениями антофиллита вокруг исходного Ca-Na-плагиоклаза;

3) каймы антофиллита вокруг исходных ортопироксена и жедрита.

Оценки РТ-параметров метаморфизма производились с использованием традиционных минералогических геотермометров и геобарометров, геотермометров на основании содержания титана в цирконе и циркония в рутиле, а также термодинамического моделирования с использованием программного комплекса PEPLEX 672 [Connolly, 1990, 2009]. Для оценки параметров первого этапа метаморфизма использовались центральные части минералов матрикса породы, второй стадии – минералов каем. Полученные параметры для первой стадии метаморфизма –  $T = 780\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P = 8\text{--}9$  кбар, для второй стадии –  $T = 600\text{--}750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 2\text{--}4$  кбар [Sukhorukov et al., 2020].

Таким образом, для гнейсов основного и глиноземистого состава установлена двухэтапная метаморфическая история, в которой первый этап регионального метаморфизма верхов амфиболитовой фации сменяется стадией декомпрессии и повторным метаморфизмом при низких давлениях.

Для возрастных оценок были использованы U-Pb датировки по циркону и монациту из образца гранат-антофиллитовых гнейсов. На основании 20 анализов монацита выделяется два отчетливых пика возраста – около  $2451 \pm 16$  и  $2496 \pm 9,5$  млн лет. По 33 анализам циркона, лежащим в интервале 2522–2421 млн лет, выделяется один отчетливый пик около 2489 млн лет и слабозаметный пик около 2446 млн лет, что в целом совпадает с данными, полученными по монациту. Эти значения хорошо коррелируют с данными, полученными В. И. Левицким с соавт. [2010] по жилам пегматоидных гранитоидов ( $2483 \pm 4$  млн лет), и данными В. А. Глебовицкого с соавт. [2011] по U-Pb датированию монацита ( $2493 \pm 1,2$  млн лет) и Sm/Nd датированию граната и силлиманита ( $2515 \pm 17$ ,  $2456 \pm 50$ ,  $2502 \pm 17$  и  $2410 \pm 110$  млн лет).

Полученные данные возраста свидетельствуют в пользу предположения о неогархейском возрасте начала формирования Сибирского кратона [Smelov, Timofeev, 2007; Turkina et al., 2012].

## Литература

Гладкочуб Д. П., Донская Т. В., Мазукабзов А. М., Сальникова Е. Б., Склярв Е. В., Яковлева С. З. Возраст и геодинамическая интерпретация гранитоидов китайского комплекса (юг Сибирского кратона) // Геология и геофизика. 2005. Т. 46(11). С. 1139–1150.

Глебовицкий В. А., Левченко О. А., Левицкий В. И., Ризванова Н. Г., Левский Л. К., Богомолов Е. С., Левицкий И. В. Возрастные рубежи проявления метаморфизма на Китайском силлиманитовом месторождении (Юго-Восточное Присянье) // ДАН. 2011. Т. 436, № 3. С. 351–355.

Левицкий В. И., Резницкий Л. З., Сальникова Е. Б., Левицкий И. В., Котов А. Б., Бараш И. Г., Яковлева С. З., Анисимова И. В., Плоткина Ю. В. Возраст и происхождение Китайского месторождения силлиманитовых сланцев (Восточная Сибирь) // ДАН. 2010. Т. 431, № 3. С. 386–391.

Connolly J. A. D. Multivariable phase diagrams: An algorithm based on generalized thermodynamics // Am. J. Sci. 1990. Vol. 290. P. 666–718. doi: 10.2475/ajs.290.6.666

Connolly J. A. D. The geodynamic equation of state: What and how // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2009. Vol. 10, iss. 10. Q10014. doi: 10.1029/2009GC002540

Smelov A. P., Timofeev V. F. The age of the North Asian Cratonic basement: an overview // Gondwana Research. 2007. Vol. 12. P. 279–288. doi: 10.1016/j.gr.2006.10.017

Sukhorukov V. P., Savel'eva V. B. Two episodes of metamorphism in the rocks of the Eastern Kitoi block (Sharyzhalgai uplift of the Siberian platform) according to the garnet amphibolite data // Geodynamics & Tectonophysics. 2020. Vol. 11(1). P. 107–121. doi: 10.5800/GT-2020-11-1-0466

Sukhorukov V. P., Savel'eva V. B., Jiang Y., Li Zh. P-T path of metamorphism and U-Pb monazite and zircon age of the Kitoi terrane: Implication for Neoproterozoic collision in SW Siberian Craton // Geoscience Frontiers. 2020. Vol. 1(6). P. 1915–1934. doi: 10.1016/j.gsf.2020.05.012

Turkina O. M., Berezhnaya N. G., Lepekina E. N., Kapitonov I. N. U-Pb (SHRIMP II), Lu-Hf isotope and trace element geochemistry of zircons from high-grade metamorphic rocks of the Irkut terrane, Sharyzhalgai Uplift: implications for the Neoproterozoic evolution of the Siberian Craton // Gondwana Research. 2012. Vol. 21. P. 801–817. doi: 10.1016/j.gr.2011.09.012

## References

Connolly J. A. D. Multivariable phase diagrams: An algorithm based on generalized thermodynamics. *Am. J. Sci.* 1990;290:666–718. doi: 10.2475/ajs.290.6.666

Connolly J. A. D. The geodynamic equation of state: What and how. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2009;10(10): Q10014. doi: 10.1029/2009GC002540

Gladkochub D. P., Donskaya T. V., Mazukabzov A. M., Sal'nikova E. B., Sklyarov E. V., Yakovleva S. Z. The age and geodynamic interpretation of the Kitoi granitoid complex (southern Siberian Craton). *Russ. Geol. Geophys.* 2005;46:1121–1133.

Glebovitskii V. A., Levchenko O. A., Levitskii V. I., Rizvanova N. G., Levskii L. K., Bogomolov E. S., Levitskii I. V. Age stages of metamorphism at the Kitoi Sillimanite schist deposit, southeastern Prisyanye. *Dokl. Earth Sci.* 2011;436:13–17.

Levitskii V. I., Reznitskii L. Z., Sal'nikova E. B., Levitskii I. V., Kотов A. B., Barash I. G., Yakovleva S. Z.,

Anisimova I. V., Plotkina Yu. V. Age and origin of the Kitoi sillimanite schist deposit, eastern Siberia. *Dokl. Earth Sci.* 2010;413(1):394.

Smelov A. P., Timofeev V. F. The age of the North Asian Cratonic basement: an overview. *Gondwana Research.* 2007;12:279–288. doi: 10.1016/j.gr.2006.10.017

Sukhorukov V. P., Savel'eva V. B. Two episodes of metamorphism in the rocks of the Eastern Kitoi block (Sharyzhalgai uplift of the Siberian platform) according to the garnet amphibolite data. *Geodynamics & Tectonophysics.* 2020;11(1):107–121. doi: 10.5800/GT-2020-11-1-0466

Sukhorukov V. P., Savel'eva V. B., Jiang Y., Li Zh. P-T path of metamorphism and U-Pb monazite and zircon age of the Kitoi terrane: Implication for Neoproterozoic collision in SW Siberian Craton. *Geoscience Frontiers.* 2020;1(6):1915–1934 doi: 10.1016/j.gsf.2020.05.012

Turkina O. M., Berezhnaya N. G., Lepekhina E. N., Kapitonov I. N. U-Pb (SHRIMP II), Lu-Hf isotope and trace element geochemistry of zircons from high-grade metamorphic rocks of the Irkut terrane, Sharyzhalgai Uplift: implications for the Neoproterozoic evolution of the Siberian Craton. *Gondwana Research.* 2012;21:801–817. doi: 10.1016/j.gr.2011.09.012

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Сухоруков Василий Петрович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

e-mail: svp@igm.nsc.ru

**Савельева Валентина Борисовна**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

e-mail: vsavel@crust.irk.ru

#### **CONTRIBUTORS:**

**Sukhorukov, Vasily**

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

**Savel'eva, Valentina**

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

УДК 552.4

## АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА МАНТИЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ БАЗИТОВЫХ АССОЦИАЦИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНЫХ Nd-ДАНЫХ

О. М. Туркина

*Институт геологии и минералогии СО РАН (пр. Академика Колтуга, 3, Новосибирск, Россия, 630090)*

Величины  $(La/Nb)_{pm}$ ,  $(Th/La)_{pm}$ ,  $(La/Sm)_{pm}$ ,  $(Nb/Y)_{pm}$  отношений  $< 1$  в мафических породах отвечают деплетированному мантийному источнику, тогда как аналогичные величины  $\geq 1$  – недеплетированному/обогащенному.  $(La/Nb)_{pm}$  не изменяется при плавлении мантийных перидотитов, Nb-минимум – это характеристика литосферной мантии, метасоматизированной флюидом/расплавом. По изотопному Nd-составу выделяется два источника: 1) деплетированный ( $+\epsilon_{Nd}$ ), который отвечает астеносферной и/или литосферной мантии реститового происхождения; 2) обогащенный ( $-\epsilon_{Nd}$ ) литосферный с пониженным Sm/Nd в результате метасоматоза. Оценки характера мантийных источников мафических пород по их редкоэлементному и изотопному составу могут как коррелировать между собой, так и различаться.

Ключевые слова: мафические породы; редкие элементы; изотопный состав; мантийные источники

Для цитирования: Туркина О. М. Анализ характера мантийных источников базитовых ассоциаций на основе геохимических и изотопных Nd-данных // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 148–151. doi: 10.17076/geo1658

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ИГМ СО РАН.

### O. M. Turkina. ANALYSIS OF MANTLE SOURCES FOR MAFIC ASSOCIATIONS ON THE BASIS OF GEOCHEMICAL AND Nd ISOTOPIC DATA

*Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koltuga Ave., 630090 Novosibirsk, Russia)*

The  $(La/Nb)_{pm}$ ,  $(Th/La)_{pm}$ ,  $(La/Sm)_{pm}$ ,  $(Nb/Y)_{pm}$  ratios  $< 1$  in mafic rocks correspond to a depleted mantle source, while  $\geq 1$  corresponds to an undepleted/enriched source.  $(La/Nb)_{pm}$  does not change during melting of mantle peridotites, so the Nd minimum is a characteristic feature of the lithospheric mantle metasomatized by fluid/melt. According to the isotopic Nd composition, there are two mantle sources: (1) depleted ( $+\epsilon_{Nd}$ ), which corresponds to the asthenospheric and/or lithospheric mantle of restite origin, (2) enriched ( $-\epsilon_{Nd}$ ) lithospheric, having a lowered Sm/Nd due to metasomatism. Estimates

of the characteristics of the mantle sources of mafic rocks based on their trace element- and isotopic composition can either correlate with each other or differ.

Keywords: mafic rocks; trace element; isotopic composition; mantle sources

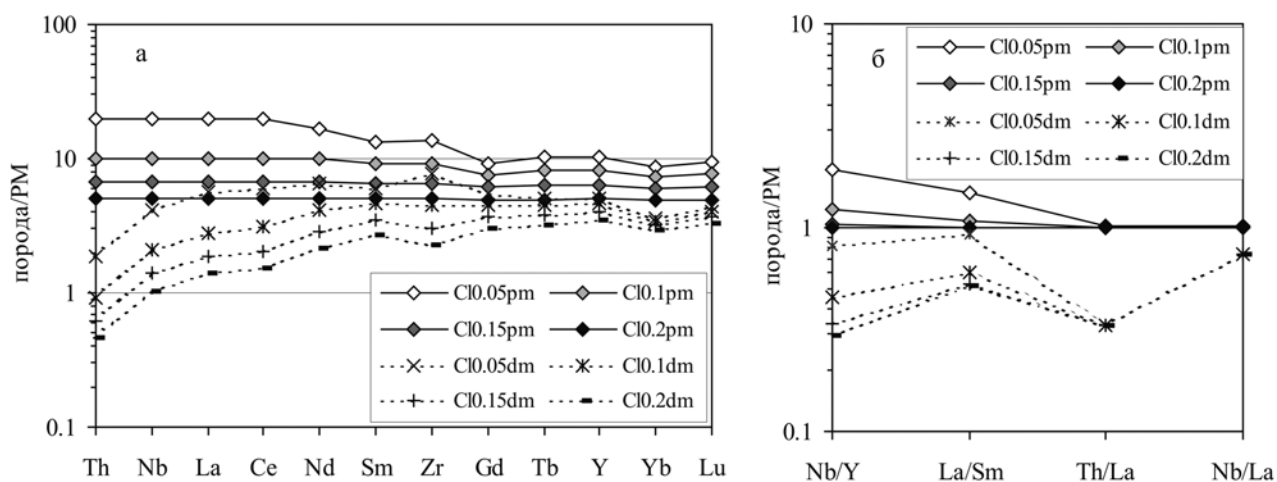
For citation: Turkina O. M. Analysis of mantle sources for mafic associations on the basis of geochemical and Nd isotopic data. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:148–151. doi: 10.17076/geo1658

Funding. The study was funded within state-ordered research theme of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Для суждения о составе мантии и его изменении во времени имеется два источника сведений. Прямую информацию дают перидотитовые ксенолиты из кимберлитовых трубок, но они являются пробами только литосферной мантии преимущественно под древними кратонами. Косвенными источниками сведений являются мафические магматические породы, которые продуцируются различными мантийными источниками, главным образом литосферной и астеносферной мантией. Преимущество мафических пород для оценки мантийных источников состоит в том, что по ним может быть получен возраст и, следовательно, удастся проследить изменение состава мантии во времени. Их слабая сторона заключается во фракционировании элементов в процессах плавления/кристаллизации, что требует применения особых приемов для реконструкции геохимических характеристик мантийных источников. Важным дополнением к анализу состава мантии служит изотопный состав мафических пород, который тождественен таковому источника, но в отличие от редкоземельного является долговременной его характеристикой из-за больших периодов полураспада используемых изотопов. В настоящем сообщении приводится анализ возможных индикаторных геохимических параметров, позволяющий оценить характер мантийных источников мафических пород.

В работе [Hofmann, 1997] показано, что отношения сильно несовместимых редких элементов практически не изменяются в процессе плавления, то есть их отношения в базитовых расплавах близки к таковым в мантийных источниках. Это заключение можно продемонстрировать путем расчетного моделирования плавления перидотитов, отвечающих по составу примитивной и деплетированной мантии (рис., а). В первом случае отношения  $(La/Nb)_{pm}$ ,  $(Th/La)_{pm}$ ,  $(La/Sm)_{pm}$  при степени плавления (F) 5–20 % равны примитивно-мантийным, а  $(Nb/Y)_{pm}$  возрастает до 2 при F = 5 %, при плавлении же деплетированного источника

расплав, соответственно, имеет близкие к нему отношения (рис., б). Из этого следует, что  $(La/Nb)_{pm}$ ,  $(Th/La)_{pm}$ ,  $(La/Sm)_{pm}$ ,  $(Nb/Y)_{pm}$  отношения  $< 1$  в мафических породах возможны только при плавлении деплетированного мантийного источника, тогда как значения  $\geq 1$  отвечают недеплетированному или обогащенному источнику. Наиболее информативным является  $(Nb/Y)_{pm}$ , поскольку включает элементы с максимальной разницей в коэффициентах распределения рестит/расплав и не фракционирующие в процессах мантийного метасоматоза под действием флюида/расплава. Таким образом, величина  $(Nb/Y)_{pm}$  определяет наклон базовой линии мультиэлементного спектра, проходящей через немобильные элементы, то есть отражает характер мантийного источника. Важно отметить, что плавление мантийных перидотитов не приводит к изменению  $(La/Nb)_{pm}$  из-за отсутствия реститовых фаз, обеспечивающих относительное фракционирование этих элементов, следовательно, наличие Nb-минимума на мультиэлементном спектре мафических пород является характеристикой мантийного субстрата, а именно литосферной мантии, испытавшей метасоматоз под действием флюида/расплава. Наиболее вероятен субдукционно связанный метасоматоз кремнекислым расплавом, образующимся из базитового или пелитового источника при высоком давлении и низкой степени плавления, что обеспечивает присутствие рутила среди реститовых фаз. Следует отметить, что фракционная кристаллизация мафического расплава, повышая концентрации несовместимых элементов, также не приводит к изменению их отношений подобно процессу парциального плавления. То же имеет место и при формировании плутонических мафических пород, которые сложены ассоциацией минералов (кумуляты), отвечающих различной степени кристаллизации магмы, поскольку обычный набор кристаллизующихся фаз (Ol, Орх, Срх, Pl) не вызывает относительного фракционирования рассматриваемых редких элементов [Туркина и др., 2022].



Мультиэлементные спектры (а) и индикаторные отношения элементов (б) для модельных расплавов из примитивно-мантийного ( $Cl_{pm}$ ) и деплетированного ( $Cl_{dm}$ ) мантийного источников при степени плавления от 5 до 20 %

Multi-element spectra (a) and indicator ratios of elements (b) for model melts from primitive mantle ( $Cl_{pm}$ ) and depleted ( $Cl_{dm}$ ) mantle sources at a melting degree from 5 to 20 %

Как отмечалось выше, изотопный Nd-состав мафических пород представляет долговременную характеристику их мантийного источника. Существует два принципиально различных в изотопном плане источника: 1) деплетированный с положительными  $\epsilon_{Nd}$ , который отвечает астеносферной и/или литосферной мантии реститового происхождения; 2) обогащенный с отрицательными  $\epsilon_{Nd}$ , отражающими привнос некогерентных редких элементов и понижение Sm/Nd вследствие метасоматических процессов. Обогащенная мантия отвечает литосферному источнику (субконтинентальной литосфере), которая изолирована от конвектирующей астеносферы и может сохранять долговременное изменение своего редкоэлементного и изотопного состава. Оценки характера мантийных источников мафических пород по их редкоэлементному и изотопному составу могут как коррелировать между собой, так и различаться, в последнем случае обогащение мантийного источника некогерентными редкими элементами непосредственно предшествовало плавлению и не отразилось на его изотопном составе. Образование изотопно-обогащенных мантийных источников может происходить либо задолго до плавления и формирования мафического расплава в результате метасоматоза, сопровождавшегося привнесом наиболее несовместимых редких элементов, либо практически мгновенно при участии в метасоматозе расплава из древних субдуцированных осадков. Выбор между этими

вариантами сложен и неоднозначен и требует привлечения дополнительной информации о геологической истории рассматриваемого региона.

Таким образом, комплексный анализ индикаторных отношений редких элементов позволяет оценить характер мантийных источников (деплетированный/обогащенный) мафических пород, а в сочетании с их изотопными параметрами ограничить время их формирования.

## Литература

- Туркина О. М., Изох А. Э., Лавренчук А. В., Шелепов Я. Ю. Состав и изотопные параметры метабазальтов и габброидов Онотского гранит-зеленокаменного блока (юго-запад Сибирской платформы) как индикаторы эволюции литосферной мантии от архея к палеопротерозою // Петрология. 2022. Т. 30, № 5 (в печати).
- Hofmann A. W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism // Nature. 1997. Vol. 385. P. 219–229.

## References

- Turkina O. M., Izokh A. E., Lavrenchuk A. V., Shelepov Ya. Yu. Composition and isotope parameters of metabasalts and gabbroids of the Onot Granite-Greenstone Block (Southwest Siberian Platform) as indicators of lithospheric mantle evolution from Archean to Paleoproterozoic. *Petrologiya = Petrology*. 2022;30(5) (in press). (In Russ.)
- Hofmann A. W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature*. 1997;385:219–229.

*Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 24.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Туркина Ольга Михайловна**

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

*e-mail: turkina@igm.nsc.ru*

**CONTRIBUTOR:**

**Turkina, Olga**

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

УДК 552.4

## ЭВОЛЮЦИЯ МАНТИИ ОТ АРХЕЯ К ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЮ: СИНТЕЗ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНЫХ Nd-ДАНЫХ ДЛЯ МАФИЧЕСКИХ АССОЦИАЦИЙ ЮГО-ЗАПАДА СИБИРСКОГО КРАТОНА

О. М. Туркина<sup>1\*</sup>, А. Э. Изох<sup>1</sup>, Н. Г. Бережная<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии СО РАН (пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090), \*turkina@igm.nsc.ru

<sup>2</sup> ВСЕГЕИ (Средний пр. В.О., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106)

На основании геохимических и изотопных Nd-данных по раннедокембрийским базитам оценена эволюция мантии ЮЗ Сибирского кратона от архея к палеопротерозою. Источники архейских базитов варьировали от слабодеплетированных до примитивно-мантийных, то есть архейская мантия была менее дифференцирована, чем современная. С 2,8–2,7 млрд лет предполагается формирование метасоматически измененной литосферной мантии. Геохимические и изотопные параметры палеопротерозойских базитов отражают увеличение мантийной гетерогенности и формирование долгоживущих обогащенных источников. От архея к палеопротерозою произошла дифференциация мантии по редкоэлементному и изотопному Nd-составу, обусловленная обособлением и локальным метасоматозом субконтинентальной литосферной мантии.

Ключевые слова: мафические породы; мантийные источники; архей; палеопротерозой

Для цитирования: Туркина О. М., Изох А. Э., Бережная Н. Г. Эволюция мантии от архея к палеопротерозою: синтез геохимических и изотопных Nd-данных для мафических ассоциаций юго-запада Сибирского кратона // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 152–155. doi: 10.17076/geo1657

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-05-00265).

## O. M. Turkina<sup>1\*</sup>, A. E. Izokh<sup>1</sup>, N. G. Berezhnaya<sup>2</sup>. MANTLE EVOLUTION FROM ARCHAEN TO PALEOPROTEROZOIC: SYNTHESIS OF GEOCHEMICAL AND Nd ISOTOPIC DATA ON MAFIC ASSOCIATIONS FROM THE SOUTH-WEST SIBERIAN CRATON

<sup>1</sup> Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (3 Acad. Koptuyug Ave., 630090 Novosibirsk, Russia), \*turkina@igm.nsc.ru

<sup>2</sup> VSEGEI (74 Sredny Pr. VO, 199106 St. Petersburg, Russia)



Based on trace element and Nd isotopic data on Early Precambrian mafic rocks, we traced the evolution of the mantle of the SW Siberian Craton from the Archean to the Paleoproterozoic Era. The sources of the Archean mafic rocks varied from weakly depleted to primitive mantle, i.e., the Archean mantle was less differentiated than modern one. Starting from 2.8–2.7 Ga, formation of metasomatically altered lithospheric mantle is assumed. The trace element and isotopic parameters of the Paleoproterozoic mafic rocks reflect an increase in mantle heterogeneity and formation of long-lived enriched sources. The mantle has been differentiating from the Archean towards the Paleoproterozoic in terms of trace element and Nd isotopic composition due to separation and local metasomatism of the subcontinental lithospheric mantle.

Keywords: mafic rocks; mantle sources; Archean; Paleoproterozoic

For citation: Turkina O. M., Izokh A. E., Berezhnaya N. G. Mantle evolution from Archaen to Paleoproterozoic: synthesis of geochemical and Nd isotopic data on mafic associations from the South-West Siberian Craton. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:152–155. doi: 10.17076/geo1657

Funding. The study was funded by Russian Foundation for Basic Research grant #20-05-00265.

Раннедокембрийские породы основного состава являются главным источником информации о составе эволюции мантии во времени. Метабазальты архейских зеленокаменных поясов (ЗКП) характеризуются преимущественно положительными  $\epsilon_{Nd}(t)$ , отражающими формирование из деплетированной мантии. В то же время для ряда палеопротерозойских дайковых и интрузивных комплексов установлены отрицательные значения  $\epsilon_{Nd}(t)$ , свидетельствующие о вкладе долгоживущих обогащенных источников. Анализ геохимии базальтов ЗКП выявил гетерогенность их мантийных источников, варьирующих от деплетированных до слабообогащенных, однако различия между этими источниками были малы в сравнении с различиями в мантийных источниках современных базальтов спрединговых хребтов (MORB) и океанических островов (OIB). По данным [Condie, 2018], геохимические сигнатуры, присущие обогащенным, деплетированным и гидратированным (преобразованным под действием флюида) мантийным источникам, становятся более отчетливыми у базальтов переходного периода геологической истории от 3 до 2 млрд лет.

Шарыжалгайский выступ ЮЗ Сибирского кратона состоит из гранит-зеленокаменных и гранулитогнейсовых блоков, в которых проявлены два главных этапа базитового магматизма. Мезоархейскому этапу отвечают базальты Онотского (~2,88 млрд лет) и Урикского (~2,8 млрд лет) ЗКП, а неоархейскому – магматические протолиты мафических гранулитов (~2,7–2,66 млрд лет). Палеопротерозойский постколлизийный базитовый магматизм

(1,87–1,84 млрд лет) представлен интрузиями габброноритов, монцодиоритов, габбродолеритами дайковых роев, сосредоточенных преимущественно в Иркутском гранулитовом блоке. В данной работе использована методика анализа характера источников раннедокембрийских базитов Шарыжалгайского выступа, изложенная в [Туркина, 2022], с целью проследить эволюцию мантии юго-запада Сибирского кратона от архея к палеопротерозою.

Среди архейских базитов выделяется три геохимических типа. Первый характеризуется обеднением легкими РЗЭ ( $(La/Sm)_n = 0,9–1,1$ ), отсутствием Nb-минимума ( $Nb/Nb^* = 0,9–1,8$ ) и представлен метабазальтами юга Урикского ЗКП и частью мафических гранулитов. Второй тип – это метабазальты Онотского ЗКП, слабообогащенные легкими РЗЭ ( $0,9–1,7$ ) и обедненные Nb ( $Nb/Nb^* = 0,4–0,7$ ). Третий тип характеризуется различной степенью обогащения легкими РЗЭ ( $(La/Sm)_n = 1,1–2,2$ ), отчетливым обеднением Nb ( $Nb/Nb^* = 0,2–0,8$ ) и включает метабазальты центральной части Урикского ЗКП и большинство мафических гранулитов. Два первых типа имеют  $(Nb/Y)_{pm} = 0,6–1,0$ , что отвечает слабодеплетированному источнику и согласуется с их положительными  $\epsilon_{Nd}(t)$  от +4,1 до –0,1. Расчетное моделирование показывает возможность образования базитов первого типа из слабодеплетированных до примитивно-мантийных источников, которые вероятно отвечали архейской конвектирующей мантии. Третий тип имеет слабоповышенное  $(Nb/Y)_{pm} = 0,8–1,2$ , резкое обеднение Nb и  $\epsilon_{Nd}(t)$  от +2,8 до +0,5. Модельными расчетами показана возможность его образования из исходно

деплементированного источника, метасоматизированного под действием расплава из субдущированных базитов, что предполагает генерацию из литосферной мантии. Литосферный мантийный источник наиболее вероятен и для пород второго типа из Онотского ЗКП.

Палеопротерозойские базитовые комплексы включают два контрастных геохимических типа. Первый представлен габброноритами Онотского блока с низкими  $(La/Sm)_n$  (1,0–1,4),  $(Nb/Y)_{pm}$  (0,7–1,0), слабым обеднением Nb ( $Nb/Nb^* = 0,7–1,0$ ) и  $\epsilon_{Nd}(t)$  от –0,7 до –1,4. Второй тип, доминирующий в Иркутском блоке, включает интрузивные монцогаббронориты и монцодиориты, а также габбродолериты. Все эти породы при широком диапазоне Mg# (84–39) имеют общие черты: высокое  $(La/Sm)_n = 3,0–5,4$ , повышенное  $(Nb/Y)_{pm} = 1,2–2,8$ , резкое обеднение Nb ( $Nb/Nb^* = 0,1–0,6$ ) и низкие  $\epsilon_{Nd}(t)$  от –5,9 до –9,6. Согласно модельным оценкам, источник пород первого типа был слабодеплементирован и сходен с таковым архейских базитов Онотского ЗКП, и его изотопный Nd-состав соответствует эволюции архейской мантии во времени при слабопониженном  $^{147}Sm/^{144}Nd$  (~0,19), палеопротерозойские габбронориты унаследуют и слабое обеднение Nb, присущее также мезоархейской литосферной мантии. Все эти данные предполагают литосферный мантийный источник как мезоархейских, так и палеопротерозойских базитов Онотского блока, причем основные характеристики этого источника сложились уже в архее. Как редкоэлементные, так и изотопные характеристики палеопротерозойских базитов Иркутского блока отвечают долгоживущему обогащенному литосферному мантийному источнику. Принципиальная модель его образования – это метасоматоз под действием кислого расплава, образованного, вероятно, из пород субдущирующей плиты, вклад которого оценивается в не менее 10 %. Изотопные параметры данного типа палеопротерозойских базитов требуют снижения  $^{147}Sm/^{144}Nd$  до 0,13–0,15, чтобы обеспечить эволюцию изотопного состава неархейской мантии до  $\epsilon_{Nd}(t)$  от –5,9 до –9,6.

## Выводы

1. Среди мезо-неоархейских базитов Шарыжалгая отсутствуют породы, сопоставимые по геохимии с современными NMORB и OIB. Мантийные источники архейских пород

варьировали от слабодеплементированных до примитивно-мантийных, что согласуется с их изотопными параметрами:  $\epsilon_{Nd}(t)$  от 0 до +5,2, то есть архейская как конвектирующая, так и литосферная мантия ЮЗ Сибирского кратона была слабодифференцированной. Мантийные источники архейских метабазитов Шарыжалгая должны быть менее деплементированы в отношении наиболее некогерентных элементов, чем современная DM. С рубежа 2,8–2,7 млрд лет появляются обедненные Nb базиты, что предполагает формирование литосферной мантии, изолированной от конвекции и испытавшей ту или иную форму метасоматоза.

2. Геохимические и изотопные параметры палеопротерозойских базитов Шарыжалгая свидетельствуют о резких различиях мантийных источников и появлении долгоживущих обогащенных мантийных областей к рубежу ~1,86 млрд лет. Обогащенным источником могла быть только литосферная мантия, испытавшая локальное метасоматическое преобразование в архее.

3. От мезо-неоархей к палеопротерозою произошла дифференциация мантии по редкоэлементному и изотопному Nd-составу, обусловленная обособлением субконтинентальной литосферы от конвектирующего слоя и локальным метасоматическим преобразованием ее в архее, что привело к резким различиям в источниках, генерирующих палеопротерозойские мафические магмы.

## Литература

Туркина О. М. Анализ характера мантийных источников базитовых ассоциаций на основе геохимических и изотопных Nd-данных // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 148–151. doi: 10.17076/geo1658

Condie K. C. A planet in transition: The onset of plate tectonics on Earth between 3 and 2 Ga? // *Geoscience Frontiers*. 2018. Vol. 9. P. 51–60. doi: 10.1016/j.gsf.2016.09.001

## References

Turkina O. M. Analysis of mantle sources for mafic associations on the basis of geochemical and Nd isotopic data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:148–151. doi: 10.17076/geo1658

Condie K. C. A planet in transition: The onset of plate tectonics on Earth between 3 and 2 Ga? *Geoscience Frontiers*. 2018;9:51–60. doi: 10.1016/j.gsf.2016.09.001

Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 01.09.2022.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:****Туркина Ольга Михайловна**

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

*e-mail: turkina@igm.nsc.ru*

**Изох Андрей Эмильевич**

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник

*e-mail: izokh@igm.nsc.ru*

**Бережная Наталия Георгиевна**

канд. геол.-мин. наук

*e-mail: nataliaber@mail.ru*

**CONTRIBUTORS:****Turkina, Olga**

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

**Izokh, Andrey**

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

**Berezhnaya, Natalia**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.)

УДК 553.062

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ АРХЕЙСКОГО И ПРОТЕРОЗОЙСКОГО ЭТАПОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

С. И. Турченко

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2,  
Санкт-Петербург, Россия, 199034)*

Рассматривается глобальная металлогения в период двух ранних этапов развития Земли как геологического тела – архейского и протерозойского, причем возрастное завершение последнего осуществлялось при существенном геодинамическом изменении ее поведения в Северном и Южном полушариях. Наиболее ранний возраст этап эволюции Земли – хадей представляет собой эпоху догеологической истории Земли от периода планетной аккреции  $T_0 = 4,5$  до 3,85 млрд лет и включает этапы: последней стадии аккреции Земли, образования протоядра, примитивной мантии и первичной мафитовой протокоры, а также время тяжелой метеоритной бомбардировки, когда большая часть первичной протокоры была разрушена. Распределение примитивной мантии и первичной мафитовой протокоры на поверхности Земли при ее аккреции было весьма неравномерным, что сказалось в последующем на формировании вещественных неоднородностей.

Ключевые слова: металлогения Земли; ранний и поздний докембрий; геодинамика

Для цитирования: Турченко С. И. Сравнительная металлогения архейского и протерозойского этапов геологической эволюции Земли // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 156–159. doi: 10.17076/geo1691

### **S. I. Turchenko. COMPARATIVE METALLOGENY OF THE ARCHEAN AND PROTEROZOIC STAGES IN THE GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE EARTH**

*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences  
(2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)*

The paper examines the global metallogeny during two early stages in the development of the Earth as a geological body – the Archean and the Proterozoic, the late phase of the latter happening during a significant geodynamic alteration of its behavior in the Northern and Southern hemispheres. The earliest stage in the Earth's evolution is the Hadean, which is a subdivision in the pre-geological epoch of the Earth's history starting from the period of planetary accretion  $T_0 = 4.5$  to 3.85 Ga, which included: last stages of accretion, formation of the protocore, primitive mantle and primary mafic protocrust, and the time of heavy meteorite bombardment, which destroyed a major part of the initial crust. The distribution of the primitive mantle and mafic protocrust on

the Earth's surface was rather uneven, resulting in subsequent formation of compositional inhomogeneities.

**Keywords:** metallogeny of the Earth; Early and Late Precambrian; geodynamics

For citation: Turchenko S. I. Comparative metallogeny of the Archean and Proterozoic stages in the geological evolution of the Earth. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:156–159. doi: 10.17076/geo1691

Палеоархейская эра, как ранняя часть архейской эры, с которой, собственно, и начался докембрийский этап геологического развития Земли [Snyder et al., 2000], характеризовалась набором полезных ископаемых, которые являются более типичными для неоархейско-палеопротерозойской эры. Некоторые типы месторождений в палеоархее отличаются структурно-тектоническим положением от более молодых аналогов. Например, несмотря на сходство состава флюидов и механизмов рудообразования, палеоархейские месторождения золота и колчеданных руд Cu, Zn, Pb формировались в тектонических обстановках, отличных от обстановок линейного орогенеза, характерных для более молодых докембрийских месторождений.

Ранний рост земной коры произошел в результате действия серии мантийных плюмов, вызывавших выплавление мафических базальтов, которые сформировали подобия океанических плато. Ранние плюмы инициировали коровый рост в виде изометричных структур, а не поясов, характерных для плит-тектоники. Периодическое развитие вулканических комплексов в палеобассейнах на мафит-ультрамафитовом плюмовом плато создавало идеальные условия для формирования поколения вулканогенных массивных сульфидных (колчеданных) месторождений. Такого рода объекты являлись материнским источником мафит-ультрамафитовых пород – носителей никелевого и платиноидного оруденения независимо от возраста (от палеоархей до протерозоя). Однако из-за дефицита серы в таких древнейших отложениях сульфидные никелевые и платинометалльные месторождения неизвестны, выявлены лишь небольшие месторождения (например, Шангани в Южной Африке) и рудопроявления в коматиитах с возрастом  $3526 \pm 48$  и  $\epsilon Nd +0,7$  из низов группы Онвервахт зеленокаменного пояса Барбертон в Каапваальском кратоне Южной Африки. Для мафит-ультрамафитовых пород мантийного происхождения мезо- и неоархейского возраста (3,4–2,6 млрд лет) установлены сульфидные Ni-PGE месторождения в коматиитах и телах коматиитовых перидотитов, известные

лишь в кратоне Йилгарн Западной Австралии (рудный район Камбалда), в других кратонах мира – только рудопроявления, и все они составляют ранний этап формирования Ni-PGE месторождений. Более поздними (около 2450 млн лет) Ni-PGE месторождениями являются палеопротерозойские рифтогенные месторождения Фенноскандинавского щита (Мончегорское и Федорово-Панских Тундр в России и Пенникат-Портимо в Финляндии).

Возможно, самым значительным металлогеническим отличием палеоархей от мезо-неоархей и протерозоя были обстановки, в которых развивались золоторудные месторождения. Жильные золоторудные месторождения (Iode deposits) на протяжении мезоархей-палеопротерозоя (3200–1600 млн лет) были связаны с линейными, масштаба земной коры, сдвиговыми зонами. В противоположность этому жильные золоторудные месторождения, сформированные до 3200 млн лет, были связаны с крупными кольцевыми разломами, вдоль которых концентрировались гранитные комплексы, такие как месторождения Бамбу Крик в кратоне Пилбара или месторождения Витватерсранд в кратоне Каапваал, образованные в обстановках корового растяжения.

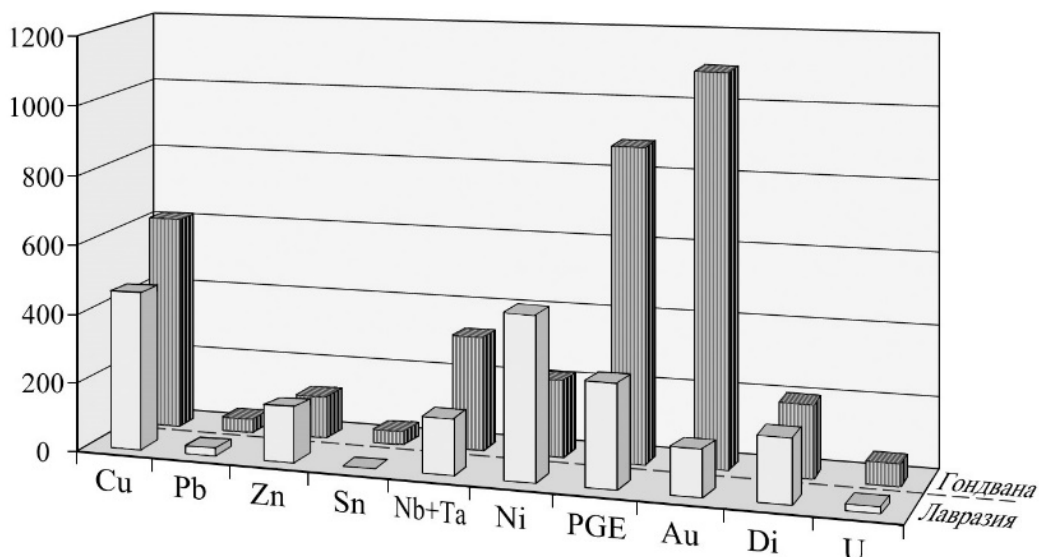
Периодические плавления литосферной мантии во время последовательных плюм-событий производили все более эволюционированные расплавы [Smithies et al., 2005], которые были перспективными для накопления литофильных элементов, типичных для редкометалльных месторождений, например, Ta- и Sn-пегматитовые месторождения в кратоне Пилбара. Первые граниты А-типа, с которыми связаны подобные месторождения, появляются лишь в неоархее (~2,8 млрд лет), и далее они прослеживаются на протяжении всей геологической истории развития Земли. Однако расцвет этого магматизма в докембрии приходится на интервал времени ~ 2,0–1,0 млрд лет. С этого времени начинается новая стадия мантийной динамики, определившей начало нового плюм-суперконтинентального цикла. Главными типами месторождений, среди которых встречаются крупные и уникальные объекты,

являются редкометалльные и Sn-редкометалльные, Cu-U-Au-REE, Fe-Ti-апатитовые и U месторождения типа «несогласий». Установлено, что большая часть крупных месторождений такого рода сформировались в два основных эпизода – 1,85–1,70 и 1,30–1,00 млрд лет, и практически все они были связаны с активностью мантийных плюмов. Эти минеральные системы образовались во внутриплитных или дуговых рифтовых тектонических условиях. К таким условиям принадлежит также формирование железорудных месторождений железистой формации в Южной Африке группы Трансвааль и бассейна Хамерсли в Австралии, а также, возможно, месторождения Кривого Рога на Украине и Костомукши, Оленегорска в Карело-Кольском регионе Фенноскандинавского щита.

Минеральные системы, связанные с анорогенным магматизмом палеопротерозоя, охватывают широкий круг магмато-гидротермальных месторождений, из которых экономически наиболее важными являются Fe-окисные-Cu-Au месторождения, такие как мирового класса месторождение Олимпик Дэм в Южной Австралии. В этой же группе находятся Pb-Zn-Ag месторождения (МакАртур, Маунт-Айза и Брокен-Хилл) с возрастом около 1700 и 1500 млн лет и Cu-Au-W месторождения (ороген Каприкорн). В щелочно-ультраосновных породах возраста 1100 и 800 млн лет, в том числе и карбонатитах

и лампроитах, были установлены месторождения алмазов, как в лампроитовых трубках Аргайл, с возрастом 1180 млн лет.

U-Pb изотопные возрасты по циркону, вместе с Nd изотопными данными, показывают значительный рост континентальной коры начиная с 1,9 млрд лет. С этим ростом коры был связан этап образования ювенильной коры в палеопротерозое. Этот пик формирования континентальной коры и, соответственно, образования континентов являлся также пиком глобального проявления металлогении. Один из последних этапов прироста коры периода 2,1–1,6 млрд лет отвечал росту суперконтинента Родиния и дальнейшему в период 1,4–0,6 млрд лет его распаду и росту протоматериков Гондвана и Лавразия. Неоднородность литосферы, существенно оформленная к конечному докембрийскому этапу геологического развития Земли, отражалась в неоднородном характере распределения месторождений в этих позднедокембрийских континентах, составляющих их минерально-сырьевой потенциал (рис.). Структурно-тектоническое развитие докембрийского протоматерика Лавразия (состоящего из фундаментов Восточно-Европейской, Восточно-Сибирской и Северо-Американской платформ) происходило по платформенному сценарию, поэтому не было и активного проявления металлогенических следствий, а отсюда и проявления разнообразных рудообразующих процессов.



Сравнительная диаграмма потенциальной ценности минеральных ресурсов протоматериков Лавразии и Гондваны [Красный, 2000; Турченко, 2022].

Di – алмазы

Comparative diagram of the potential value of the mineral resources in the Lavrasia and Gondvana proto-mainlands [Krasny, 2000; Turchenko, 2022].

Di – diamonds

В южной гемисфере Земли дело обстояло сложнее, поскольку мезо-неопротерозойская эра не заканчивалась на протоматериках Гондванской группы формированием платформенных структур, а в них продолжали развиваться позднепротерозойские орогенические зоны (1600–900 млн лет) и пояса тектоно-термальной переработки древних структур возраста около 1100 млн лет. Тектонофизическое объяснение этому различию лежит в глобально-планетарном явлении – устойчивом проявлении 23,4-градусного наклона оси вращения Земли и ее периодической прецессии на 1–1,5 градуса, возникших именно к этому периоду жизни Земли. Из-за этого более тяжелые ядерно-мантийные массы оболочек Земли сместились в сторону Южного полушария, проявив тем самым продолжение тектонофизической активности плюмовой и астеносферной природы орогенических структур позднего протерозоя в этой части планеты.

Период от 900 до 600 млн лет в Южном полушарии Земли оказался, так же как и в Северном, не очень продуктивным на проявление рудных месторождений, так как заключительный этап докембрийского геологического развития Земли и здесь от активных тектонических процессов сменился погружением континентов, которое было связано, возможно, с воздыманием океанических хребтов, т. е. началом нового этапа жизни Земли. Этот этап (фанерозойский) выразился в активном перемещении тектонических плит (активном проявлении

плейт-тектоники), созидании частых орогенических циклов и в формировании разнообразия рудообразующих процессов, достигнувших беспрецедентно высокого уровня.

## Литература

*Красный Л. И.* (ред.) Геолого-минерогеническая карта мира. Объяснительная записка. Ч. 2. Минерально-сырьевые ресурсы континентов и активных транзиталей. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 34 с.

*Турченко С. И.* Металлогения и тектоническая эволюция протоматериков Лавразия и Гондвана в докембрии // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 2. С. 5–32. doi: 10.17076/geo1522

*Snyder G. A., Borg L. E., Nyquist L. E., Taylor L. A.* Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution // *The origin of the Earth and Moon*. Univ. of Ariz. Press, 2000. P. 361–395.

## References

*Krasnyi L. I. (ed.)*. Geologic-mineragenic World map. Explanatory letters. Pt. 2. Mineral resources of continents and active transitailes. St. Petersburg: VSEGEI; 2000. 34 p. (In Russ.)

*Snyder G. A., Borg L. E., Nyquist L. E., Taylor L. A.* Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution. *The origin of the Earth and Moon*. Univ. of Ariz. Press; 2000. P. 361–395.

*Turchenko S. I.* Precambrian metallogeny and tectonic development of the Earth's protocontinents Laurasia and Gondwana. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;2:5–32. doi: 10.17076/geo1522 (In Russ.)

*Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 24.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Турченко Станислав Иванович**

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

*e-mail: turchsi@mail.ru*

## CONTRIBUTOR:

**Turchenko, Stanislav**

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Russian Academy of Natural Sciences  
Corr. Academician, Chief Researcher

УДК 551.24:551.72

## КОЛЛИЗИОННЫЙ ОРОГЕНЕЗ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ: СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТЕКТНИКА ПРИРОДНЫХ ОРОГЕНОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**А. А. Щипанский**

*Геологический институт РАН (Пыжевский пер., 7, Москва, Россия, 109017)*

Детально рассматривается глубинная тектоника палеопротерозойского коллизионного Волго-Донского орогена Восточно-Европейского кратона, реконструкция которого свидетельствует о том, что он представляет собой слабоэродированную орогеническую постройку дивергентной архитектуры. Она сложена преимущественно ювенильными метасадками, фазы ее развития хорошо сопоставляются с историей становления Гималайско-Тибетского коллизионного орогена, но не согласуются с представлениями о «горячем/ультрагорячем» стиле орогенеза в раннем докембрии, базирующимися прежде всего на результатах численного моделирования.

Ключевые слова: ранний докембрий; литосфера; ороген; коровая архитектура; коллизия

Для цитирования: Щипанский А. А. Коллизионный орогенез в палеопротерозое: сравнительная тектоника природных орогенов и результатов численного моделирования // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 160–163. doi: 10.17076/geo1693

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР ГИН РАН АААА-А20-120030690018-2.

### **A. A. Shchipansky. COLLISIONAL OROGENESIS IN THE PALEOPROTEROZOIC ERA: TECTONICS OF NATURAL OROGENS VS. NUMERICAL MODELS**

*Geological Institute, Russian Academy of Sciences (7 Pyzhevsky Per., 109017 Moscow, Russia)*

The paper considers the details of the deep tectonics of the Paleoproterozoic Volga-Don collisional orogen in the East European Craton. Its reconstruction suggests that this fold-and thrust belt represents a slightly eroded divergent orogenic structure building mostly filled with juvenal metasediments and comprises well-preserved patterns of the crustal orogenic architecture which are characteristic of the archetypal Himalayan-Tibetan collisional orogeny, contrary to ideas of hot/ultra-hot Precambrian orogeny based on numerical simulations.

Key words: Early Precambrian; lithosphere; orogen; crustal architecture; collision



For citation: Shchipansky A. A. Collisional orogenesis in the Paleoproterozoic Era: tectonics of natural orogens vs. numerical models. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:160–163. doi: 10.17076/geo1693

Funding. The study was carried out within government-funded research theme of the Geological Institute RAS AAAA-A20-120030690018-2.

Механизм раннедокембрийской орогении остается дискуссионной проблемой. Существуют две точки зрения. Первая находит параллели между современными и древними стилями орогенеза. Вторая основывается на существенных их различиях, обусловленных более высоким тепловым потоком ранней Земли, что может объяснять широкое распространение высокометаморфических пород в раннем докембрии. Однако хорошо известно, что раннедокембрийские кратоны подстилаются мощными, 200–300 км, киями холодной субконтинентальной деплетированной мантии. Роль подобной литосферы в процессах древнего коллизионного орогенеза остается малоизученной. Восточно-Европейский кратон, состоящий из трех главных коровых сегментов – Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии, сшитых между собой палеопротерозойскими орогеническими поясами [Gorbachev, Vogradanova, 1993], предоставляет возможность прояснить механизмы формирования последних с целью ответить на вопрос о том, были ли эти процессы схожими с современными или же они радикально различались. Ключевым объектом для этого исследования стал Волго-Донской ороген (ВДО), впервые выделенный Е. В. Бибиковой с соавторами [2009], который сшивает Сарматский и Волго-Уральский сегменты, подстилаемые архейскими мощными (200–300 км) мантийными киями [Artemieva, 2007]. Выбор этой структуры обусловлен тем, что, во-первых, через этот ороген вкост его простирались были пройдены два сейсмических профиля – трансект ГСЗ «Гранит» [Геотраверс..., 2002] и МОВ-ОГТ вибросейсмический трансект высокого качества 1-ЕВ [Mints et al., 2015]. Это позволяет раскрыть глубинную архитектуру коры и верхней мантии орогена, как и его соотношения с форландовыми областями архейских континентальных блоков – Сарматии и Волго-Уралии. Во-вторых, многочисленные изотопно-геохимические данные, полученные по породам из керна скважин как хинтерленда (ядра) орогена, так его форландовых областей, позволяют выяснить временные ограничения фаз динамики формирования орогена, что необходимо для его

сравнительного анализа с тектонотипом коллизионного современного орогена, коим общепризнанно рассматривается Гималайско-Тибетский ороген (ГТО).

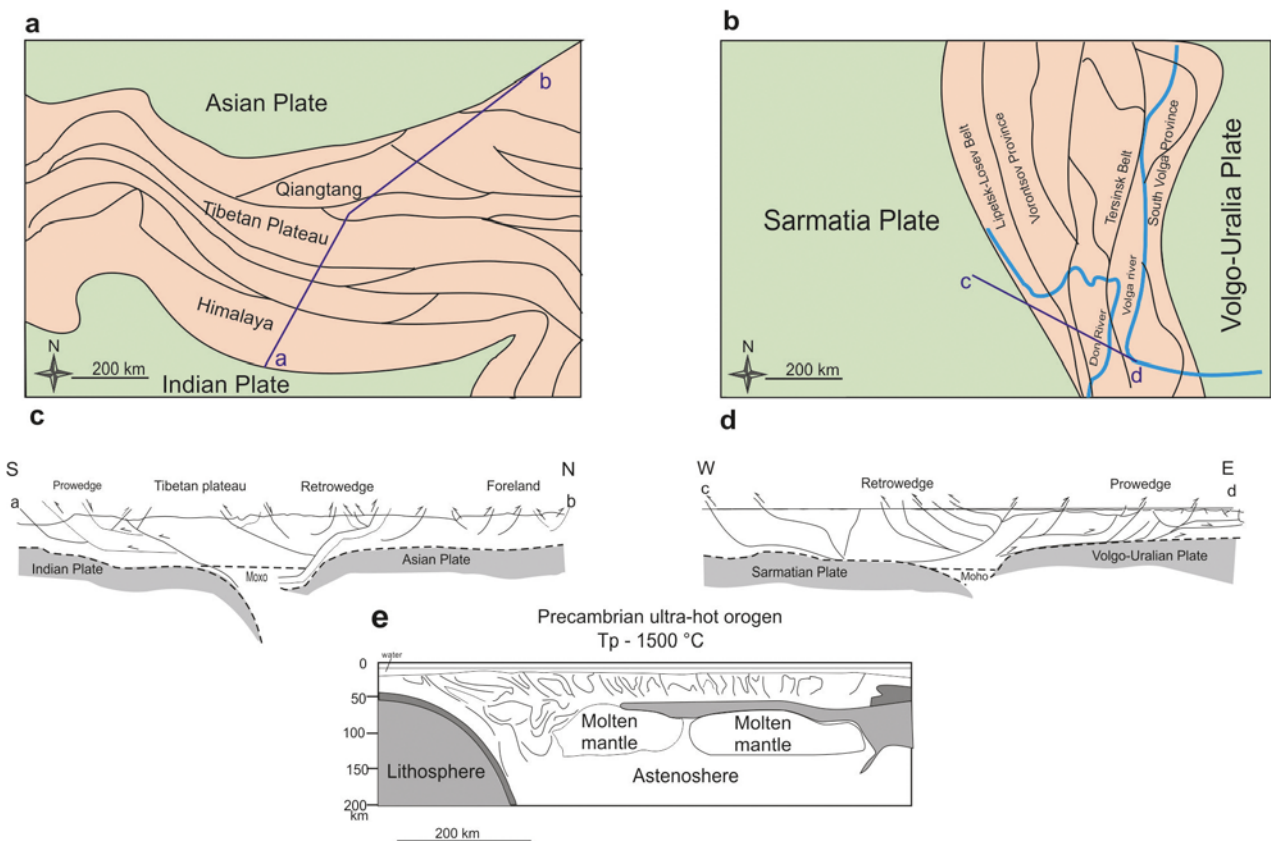
Анализ сейсмических профилей показал: 1) глубинная структура ВДО демонстрирует дивергентную архитектуру его устройства с областью смены вергентности с запада на восток (точкой сингулярности) в районе Терсинского пояса; 2) в этой же области происходит резкая смена границ кора – верхняя мантия, выражающаяся в развитии детачмента в восточной части орогена, что отсутствует в его западной части; 3) границы кора – верхняя мантия в Сарматской и Волго-Уральской части орогена также сильно различаются: в первом случае граница плоская, во втором она ундулирует с длиной волны около 100 км; 4) в районе Терсинского пояса, по данным ГСЗ, появляется линза корово-мантийной смеси, которая на протяжении всего трансрегионального профиля «Гранит» еще выделяется только под Уральским орогеном. В совокупности эти данные указывают на то, что конвергенция Волго-Уральской и Сарматской литосферных плит включала в себя различные геодинамические процессы и была диахронной. Это не может быть объяснено в рамках представлений о каком-либо одном главном триггере, ответственном за горячий/ультрагорячий орогенез в раннем докембрии, обусловленный, например, более горячей мантией ранней Земли [Sizova et al., 2005; Perchuk et al., 2016].

Напротив, имеющиеся данные по глубинной тектонике, результатам изотопно-геохимических исследований и метаморфизма ВДО хорошо описываются в рамках современной теории коллизионного орогенеза, в основе которой лежат данные по ГТО [Jamieson, Beaumont, 2013]. Уникальной для раннего докембрия характеристикой ВДО является его формационное наполнение терригенными, преимущественно ювенильными, палеопротерозойскими метаосадками Воронцовской провинции на западе и Южно-Волжской провинции на востоке. Однако для современных орогенов, включая ГТО, терригенные слаборециклированные осадочные породы являются доминирующей ли-

тологией, а окна высокометаморфизованных пород находятся в резко подчиненном объеме. Как можно видеть на рисунке, по своим размерам ВДО возраста около 2 млрд лет вполне сопоставим с ГТО. Геодинамические фазы развития этих орогенов также обнаруживают значительное сходство. Начало развития ГТО фиксируется в раннем мелу появлением активной континентальной окраины Андийского типа, которая существовала в северной части Тибетского плато. Подобная окраина начала развиваться на восточной окраине Сарматии ~ 2,1 млрд лет назад с накоплением мощного аккреционного клина Воронцовской терригенной провинции, которая известна как Восточно-Сарматский ороген [Щипанский и др., 2007]. Активное вступление в коллизию Индийской плиты произошло в раннем эоцене, и эти процессы, включающие несколько импульсов метаморфизма, продолжаются до настоящего

времени. Начало коллизии Сарматской и Волго-Уральской плит произошло, по-видимому, ~ 2,0 млрд лет назад и закончилось ~ 1,95 млрд лет назад. Таким образом, длительность коллизионных событий в обоих случаях в первом приближении является одинаковой. Это свидетельствует о том, что плейт-тектонические процессы в палеопротерозое, приводящие к коллизионному орогенезу, не сильно отличались от современной геодинамики.

Подобный вывод недавно был сделан на основании сравнительного анализа коллизионного орогенеза в истории Земли, где в качестве референтной модели использовался также ГТО [Weller et al., 2021]. ВДО не входил в этот анализ, но он является объектом, еще более сохранившимся от последующих эрозионных процессов, и, следовательно, может рассматриваться как непосредственный палеопротерозойский аналог ГТО.



Сравнительные характеристики природных орогенов и орогена по результатам численного моделирования: (a, b) – сравнение размеров Гималайско-Тибетского и Волго-Донского орогенов. Как можно видеть, ширина и характер структуры обнаруживают заметное сходство; (c, d) – схематические геологические разрезы Гималайско-Тибетского и Волго-Донского орогенов; (e) – докембрийский ультрагорячий ороген по результатам численного моделирования [Perchuk et al., 2016]

**Natural vs. model orogens:**

(a, b) – a comparison in size and structural patterns between the Himalayan-Tibetan and Volgo-Don orogens. As one can see, both orogens have the same width; (c, d) – schematic geologic cross-sections of the Himalayan-Tibetan and Volgo-Don orogens; (e) – Precambrian ultra-hot orogen by numerical modeling [Perchuk et al., 2016]

## Литература

Бибикова Е. В., Богданова С. В., Постников А. В., Попова Л. П., Кирнозова Т. И., Фугзан М. М., Глушченко В. В. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супра-крупных пород и гранитоидов // Стратиграфия и геологическая корреляция. 2009. Т. 17, № 6. С. 3–16.

Геотраверс «Гранит»: Восточно-Европейская платформа – Урал – Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / Под ред. С. Н. Кашубина; Главное управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Свердловской области, ФГУП «Баженовская геофизическая экспедиция». Екатеринбург, 2002. 312 с.

Щипанский А. А., Самсонов А. В., Петрова А. Ю., Ларионова Ю. А. Геодинамика восточной части Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника. 2007. № 1. С. 43–70.

Artemieva I. M. Dynamic topography of the East European Craton: shedding light upon the lithospheric structure, composition and mantle dynamics // *Global and Planetary Change*. 2007. Vol. 58. P. 411–434. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.02.013

Gorbatshev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic Shield // *Precambrian Res.* 1993. Vol. 64. P. 3–21. doi: 10.1016/0301-9268(93)90066-B

Jamieson R. A., Beaumont C. On the origin of orogens // *Geol. Soc. Am., Bulletin*. 2013. Vol. 125. P. 1671–1702. doi: 10.1130/B30855.1

Mints M. V., Dokukina K. A., Konilov A. N., Philippova I. B., Zlobin V. L., Babayants P. S., Belousova E. A., Blokh Y. I., Bogina M. M., Bush W. A., Dokukin P. A., Kaulina T. V., Natapov L. M., Piip V. B., Stupak V. M., Suleimanov A. K., Trusov A. A., Van K. V., Zamozhniaya N. G. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure // *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.* 2015. Vol. 510. 433 p. doi: 10.1130/2015.2510

Perchuk A. L., Safonov O. G., Smit C. A., van Reenen D. D., Zakharov V. S., Gerya T. V. Precambrian ultrahot orogenic factory: Making and reworking of continental crust // *Tectonophysics*. 2016. Vol. 746. P. 572–586. doi: 10.1016/j.tecto.2016.11.041

Sizova E., Gerya T., Brown M. Contrasting styles of Phanerozoic and Precambrian continental collision // *Gondwana Res.* 2014. Vol. 25, iss. 2. P. 522–545. doi: 10.1016/j.gr.2012.12.011

Weller O. M., Mottram C. M., St-Onge M. R., Möller Ch., Strachan R., Rivers T., Copley A. The metamorphic and magmatic record of collisional orogens // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021. Vol. 2. P. 781–799. doi: 10.1038/s43017-021-00218-z

Поступила в редакцию / received: 23.08.2022; принята к публикации / accepted: 01.09.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Щипанский Андрей Анатольевич

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник,  
руководитель лаборатории тектоники раннего докембрия

e-mail: shchipansky@mail.ru

## References

Artemieva I. M. Dynamic topography of the East European Craton: shedding light upon the lithospheric structure, composition and mantle dynamics. *Global and Planetary Change*. 2007;58:411–434. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.02.013

Bibikova E. V., Kirnozova T. I., Fugzan M. M., Bogdanova S. V., Postnikov A. V., Popova L. P., Glushchenko V. V. Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: Isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2009;17(6):561–573. doi: 10.1134/S086959380906001X

Gorbatshev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic Shield. *Precambrian Res.* 1993;64:3–21. doi: 10.1016/0301-9268(93)90066-B

Jamieson R. A., Beaumont C. On the origin of orogens. *Geol. Soc. Am., Bulletin*. 2013. Vol. 125. P. 1671–1702. doi: 10.1130/B30855.1

Kashubin S. N. (ed.). Geotraverse GRANIT: The east European platform – the Urals – Western Siberia (the structure of crust by results of complex geologic-geophysical researches). Екатеринбург; 2002. 312 p.

Mints M. V., Dokukina K. A., Konilov A. N., Philippova I. B., Zlobin V. L., Babayants P. S., Belousova E. A., Blokh Y. I., Bogina M. M., Bush W. A., Dokukin P. A., Kaulina T. V., Natapov L. M., Piip V. B., Stupak V. M., Suleimanov A. K., Trusov A. A., Van K. V., Zamozhniaya N. G. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure. *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.* 2015;510. 433 p. doi: 10.1130/2015.2510

Perchuk A. L., Safonov O. G., Smit C. A., van Reenen D. D., Zakharov V. S., Gerya T. V. Precambrian ultrahot orogenic factory: Making and reworking of continental crust. *Tectonophysics*. 2016;746:572–586. doi: 10.1016/j.tecto.2016.11.041

Sizova E., Gerya T., Brown M. Contrasting styles of Phanerozoic and Precambrian continental collision. *Gondwana Res.* 2014;25(2):522–545. doi: 10.1016/j.gr.2012.12.011

Shchipansky A. A., Samsonov A. V., Larionova Yu. O., Petrova A. Yu. Geodynamics of the eastern margin of Sarmatia in the Paleoproterozoic. *Geotectonics*. 2007;41(1):38–62. doi: 10.1134/S0016852107010050

Weller O. M., Mottram C. M., St-Onge M. R., Möller Ch., Strachan R., Rivers T., Copley A. The metamorphic and magmatic record of collisional orogens. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021;2:781–799. doi: 10.1038/s43017-021-00218-z

## CONTRIBUTOR:

Shchipansky, Andrey

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Head of Laborator

## РОССИЙСКИЙ ДОКЕМБРИЙСКИЙ САММИТ – ПРОДОЛЖЕНИЕ СЛЕДУЕТ

7–9 сентября 2022 года в Петрозаводске прошла всероссийская (с участием зарубежных ученых) конференция «Геология и геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем» (ГРД-2022). Ее открывали генеральный директор КарНЦ РАН чл.-корр. РАН О. Н. Бахмет, директор Института геологии КарНЦ РАН С. А. Светов и председатель оргкомитета конференции А. И. Слабунов. Это мероприятие относится к числу регулярных и проводится Институтом геологии КарНЦ РАН в седьмой раз. Первые две конференции этого цикла состоялись в 1997 и 2005 гг. и были посвящены геологии и геодинамике Беломорской провинции, две следующие (2009 и 2011 гг.) концентрировались на рассмотрении гранит-зеленокаменных систем и их современных аналогов, в 2014 г. состоялась международная конференция «Докембрийские высокометаморфические подвижные пояса», в 2017-м – «Геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем», и наконец – ГРД-2022. Все эти собрания ученых объединяет идея поиска путей познания истории ранней Земли и тестирование возможностей метода актуализма.

В работе конференции приняли участие 40 специалистов из ведущих научных центров России (Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Екатеринбурга, Воронежа, Апатитов, Владивостока, Якутска), а также Азербайджана. Большая часть докладов были представлены по проверенной временем технологии – лично учеными в зале перед аудиторией, с ответами на вопросы коллег. Однако и возможности интернет-общения использованы в полной мере, что позволило сделать доклады коллегам, ко-

торые не смогли приехать в Карелию, а также расширило число участников-слушателей. Проводилась также сессия стендовых докладов с их последующим обсуждением.

Познание ранней истории Земли, в том числе особенностей ее геологии и геодинамики, – одна из фундаментальных задач современной геологии. Дело в том, что это наиболее продолжительная (с 4,5 до 0,54 млрд лет) часть истории нашей планеты, и без ответа на вопрос о том, какой она была в прошлом, нельзя прогнозировать дальнейшую ее судьбу, продуктивно искать полезные ископаемые. Исходя из этого, главные темы, которым были посвящены доклады на ГРД-2022, касались: 1) геологии и геодинамики раннего докембрия, оценки их сходства и различия с современными; 2) сравнительного анализа геологии и геодинамики архея и протерозоя; 3) суперконтинентальной цикличности и связи ее с геодинамикой; 4) магматических и метаморфических процессов – индикаторов геодинамических обстановок. География докладов была весьма широка и включала новые данные по геологии фундамента Восточно-Европейского, Сибирского и Антарктического кратонов, Уральского и Альпийско-Гималайского орогенов.

Важной составляющей конференции явились научные экскурсии «Ранний докембрий Фенноскандинавского щита: Беломорская провинция» (подготовлена и проведена В. В. Балаганским, Геологический институт Кольского НЦ РАН, г. Апатиты, и А. И. Слабуновым, ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск) и «Ранний докембрий Фенноскандинавского щита: Карельский кратон» (подготовлена и проведена С. А. Световым и П. В. Медведевым, ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск).



На торжественном открытии конференции выступает генеральный директор КарНЦ РАН чл.-корр. РАН О. Н. Бахмет



Участники конференции во время перерыва в работе



Доклад д. г.-м. н. О. П. Полянского (г. Новосибирск)



Вопрос докладчику задает профессор Н. В. Лубнина (г. Москва)



На стендовой сессии



Участники экскурсии на знаменитых эколгитах о. Столбиха (Белое море)



Обсуждение результатов исследований во время экскурсии в р-не п. Гирвас

В ходе первой экскурсии участники познакомились с особенностями строения Беломорского подвижного пояса, осмотрев обнажения на маршруте Апатиты – Салмы – Кандалакша – оз. Кереть – д. Гридино. Во время второй проехали по маршруту Ялгора – Петрозаводск – Косалма – Медвежьегорск – Сегозеро – Гирвас – Петрозаводск и имели возможность узнать много нового о геологии архея и протерозоя центральной части Карельского кратона.

В резолюции конференции участники констатировали, что форум прошел плодотворно и существует необходимость его регулярного

проведения с периодичностью раз в 2–3 года (прозвучало предложение назвать это мероприятие «докембрийским саммитом»), а также поддержали идею Института геологии КарНЦ РАН об организации научного журнала с рабочим названием «Геология докембрия» (преемника серии «Геология докембрия» журнала «Труды Карельского научного центра РАН»).

*А. И. Слабунов, С. А. Светов, А. В. Степанова.  
Фото М. А. Дмитриевой, А. А. Кравченко,  
А. И. Слабунова*



## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации  
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершенных оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, утраты науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учетом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются электронная версия статьи, которую авторы вычитывают и заверяют.

Журнал имеет систему электронной редакции на базе Open Journal System (OJS), позволяющую вести представление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронном формате и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Содержание выпусков Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные версии статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

### ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объем рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объем рисунков не должен превышать 1/4 объема статьи. Рукописи большего объема (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word в систему электронной редакции на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо высылаются на e-mail: [trudy@krc.karelia.ru](mailto:trudy@krc.karelia.ru), или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

Для публикации в выпусках серии «Математическое моделирование и информационные технологии» рукописи принимаются в формате .tex (LaTeX 2ε) с использованием стилевого файла, который находится по адресу <http://transactions.krc.karelia.ru/section.php?id=755>.

### **Обязательные элементы рукописи располагаются в следующем порядке:**

УДК курсивом в левом верхнем углу первой страницы; заглавие статьи на русском языке полужирным шрифтом; инициалы и фамилии авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название и полный почтовый адрес организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов аффилированным организациям; следует отметить звездочкой автора, ответственного за переписку, и указать в аффилиации его электронный адрес); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; указание источников финансирования выполненных исследований на русском языке.

Далее располагаются все вышеуказанные элементы на английском языке.

Текст статьи (статьи экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности; списки литературы на языке оригинала (**Литература**) и на английском языке (**References**); таблицы на русском и английском языках (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам на русском и английском языках (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; можно указать телефон для контакта редакции с авторами статьи.

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать ее содержание и состоять из 8–10 значащих слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (как правило, не менее пяти). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце точка не ставится.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. На табличный и иллюстративный материал следует ссылаться так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т.д.), фотографии, помещаемые на вкладышах (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо первым словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации.

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (\*.TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы могут быть снабжены указанием желательного размера рисунка, пожеланиями и требованиями к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательна приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где обозначен представленный на основной карте участок.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточную информацию для того, чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

**ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ.** Названия таксонов рода и вида даются курсивом. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательным годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L., 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicus* (Gmelin, 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

**СОКРАЩЕНИЯ.** Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все прочие сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Располагаются после основного текста статьи отдельным абзацем, в котором авторы выражают признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и организациям, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи.

**ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ.** При подаче статьи авторы должны раскрыть потенциальные конфликты интересов, которые могут быть восприняты как оказавшие влияние на результаты или выводы, представленные в работе. Если конфликт интересов отсутствует, следует об этом сообщить в отдельной формулировке.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Источники располагаются в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами авторов ставится пробел.

**REFERENCES.** Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Библиографические записи источников оформляются согласно стилю Vancouver (см. примеры в ГОСТ Р 7.0.7-2021 и образцы ниже) и располагаются в алфавитном порядке. Заголовки русскоязычных работ приводятся на английском языке; для журналов и сборников, в которых размещены цитируемые работы, указывается параллельное английское наименование (при его наличии) либо русскоязычное наименование приводится в латинской транслитерации (вариант BSI) с переводом на английский язык. Прочие элементы библиографической записи приводятся на английском языке (русскоязычное название издательства транслитерируется). При наличии переводной версии источника в References желательно указать ее. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала.

Для каждого источника обязательно указание DOI при его наличии; если приводится адрес интернет-страницы источника (URL), нужно указать дату обращения к ней.

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 577.125.8

### **СОДЕРЖАНИЕ МЕТАБОЛИТОВ ОКСИДА АЗОТА В КРОВИ ЗДОРОВЫХ ЛЮДЕЙ И ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗНЫЕ АЛЛЕЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ГЕНОВ ACE (RS4340) И CYP11B2 (RS1799998)**

**Л. В. Топчиева<sup>1\*</sup>, О. В. Балан<sup>1</sup>, В. А. Корнева<sup>2</sup>, И. Е. Малышева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), \*topchieva@ya.ru

<sup>2</sup>Петрозаводский государственный университет (просп. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: артериальная гипертензия; оксид азота; индуцибельная синтаза оксида азота; ангиотензинпревращающий фермент; инсерционно-делеционный полиморфизм гена ACE; альдостеронсинтаза; ген CYP11B2

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (0218-2019-0077).

### **L. V. Topchieva<sup>1\*</sup>, O. V. Balan<sup>1</sup>, V. A. Korneva<sup>2</sup>, I. E. Malysheva<sup>1</sup>. THE NITRIC OXIDE LEVEL IN THE BLOOD OF HEALTHY PEOPLE AND PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION CARRYING DIFFERENT ALLELE VARIANTS OF THE ACE (RS4340) AND CYP11B2 (RS1799998) GENES**

<sup>1</sup>Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), \*topchieva@ya.ru

<sup>2</sup>Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

Аннотация на английском языке

Keywords: arterial hypertension; nitric oxide; inducible nitric oxide synthase; angiotensin-converting enzyme; insertion-deletion polymorphism of ACE genes; aldosterone synthase; CYP11B2 gene

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (0218-2019-0077).

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм <sup>2</sup> Chloroplast cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм <sup>2</sup> Mitochondria cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм <sup>2</sup> Peroxisome cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

а – электронная микрофотография кварца; б – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; в – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

а – electron microphotograph of the quartz sample; б – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; в – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

## ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК В СПИСКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

### Литература:

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Красная книга Республики Карелия / Ред. О. Л. Кузнецов. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

### References:

Vol'f G. N. Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publ.; 1970. P. 348–350. (In Russ.)

Patrushev L. I. Gene expression. Moscow: Nauka Publ.; 2000. 830 p. (In Russ.)

Kuznetsov O. L. (ed.). Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod: Konstanta Publ.; 2020. 448 p. (In Russ.)

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. N. Y., San Francisco: Acad. Press; 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

### Литература:

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журнал общей биологии. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Колосова Ю. С., Подболоцкая М. В. Популяционная динамика шмелей (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) на Соловецком архипелаге: итоги 10-летнего мониторинга // Труды Русского энтомологического общества. 2010. Т. 81, № 2. С. 135–141.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia // Entomologica Fennica. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 4–8. doi: 10.33338/ef.84453

#### References:

Viktorov G. A. Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera. *Biology Bulletin Reviews*. 1970;31(2):247–255. (In Russ.)

Kolosova Yu. S., Podbolotskaya M. V. Population dynamics of bumblebees (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) in the Solovetsky archipelago: results of 10-year monitoring. *Trudy Russ. entomol. obshchestva = Proceed. Russ. Entomol. Soc.* 2010;81(2):135–141. (In Russ.)

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978;12(4):507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia. *Entomologica Fennica*. 2009;20(1):4–8. doi: 10.33338/ef.84453

Ссылки на материалы конференций

#### Литература:

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

#### References:

Mar'inskikh D. M. Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen). *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) = Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)*. Novosibirsk; 2000. P. 125–128. (In Russ.)

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

#### Литература:

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

#### References:

Sheftel' B. I. Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1985. 23 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ссылки на патенты

#### Литература:

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат / Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

#### References:

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optoelectronic apparatus. Russian patent No. 2122745. 1998. Bull. No. 33. (In Russ.)

Ссылки на архивные материалы

#### Литература:

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

#### References:

Grebenshchikov Ya. P. Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924. *OR RNB*. F. 41. St. un. 45. L. 1–10. (In Russ.)

## Ссылки на интернет-ресурсы

### **Литература:**

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

### **References:**

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services. *Elektron. b-ki = Digital library*. 2003;6(1). (In Russ.) URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

**Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences**  
**No. 5, 2022**  
**“PRECAMBRIAN GEOLOGY” Series**

**TABLE OF CONTENTS**

EDITORIAL .....	5
SHORT COMMUNICATIONS	
I. A. Abdrakhmanov, Yu. L. Gulbin, I. M. Gembitskaya. EVOLUTION OF MINERAL ASSEMBLAGES IN GRANULITES FROM BUNGER HILLS, EAST ANTARCTICA, AS A RESULT OF THEIR GEODYNAMIC SETTINGS .....	6
P. Ya. Azimov. ORIGIN OF THE “COLD” (LOW-TEMPERATURE) GRANULITES IN THE BELOMORIAN MOBILE BELT: THE ROLE OF CARBON DIOXIDE IN METAMORPHIC FLUID .....	10
A. A. Arzamastsev. EVOLUTION OF MAGMATISM IN THE PALEOPROTEROZOIC PECHENGA-VARZUGA RIFT IN LIGHT OF NEW DATA ON NEOGENE-QUATERNARY RIFT STRUCTURES OF EAST AFRICA .....	14
S. K. Baltybaev. SVECOFENNIAN ACCRETION OROGEN: MODERN VIEWS ON ITS STRUCTURE AND EVOLUTION .....	18
N. A. Bozhko. SOME FEATURES OF NEOPROTEROZOIC GEODYNAMICS .....	22
O. I. Volodichev, T. I. Kuzenko. ZIRCONS FROM MASSIVE ECLOGITES ON STOLBIKHA ISLAND, GRIDINO AREA, BELOMORIAN PROVINCE, FENNOSCANDIAN SHIELD .....	26
S. V. Vysotskiy, T. A. Velivetskaya, A. V. Ignatiev. MULTI-ISOTOPE ( $\delta^{33}\text{S}$ , $\delta^{34}\text{S}$ , $\delta^{36}\text{S}$ ) COMPOSITION OF SULFUR IN SULFIDES OF ANCIENT ORES: SIGNIFICANCE FOR DETERMINING SULFUR SOURCES, BIOGEOCHEMICAL PROCESSES AND DEPOSIT GENESIS .....	30
K. G. Erofeeva, A. V. Samsonov, T. A. Pilitsyna, A. N. Larionov, V. A. Spiridonov, A. V. Postnikov, A. Yu. Vovshina, A. S. Dubenskiy. RELICTS OF DESTROYED OCEANIC ISLAND ARCS IN THE PALEOPROTEROZOIC WYATKA OROGEN (EAST-EUROPEAN CRATON) .....	34
N. A. Imamverdiyev. ANCIENT SUBDUCTION PROCESS EFFECT ON THE ORIGIN OF LATE-COLLISION VOLCANISM IN THE LESSER CAUCASUS .....	38
T. V. Kaulina, L. I. Nerovich, V. I. Bocharov, V. V. Shilovskikh, V. L. Il'chenko. PALEOPROTEROZOIC LAYERED JARVA-VARAKA MASSIF (KOLA REGION) – A PROBABLE ASTROBLEME .....	42
P. S. Kozlov. NORTH YENISEI OROGEN (WEST SIBERIAN CRATON): GENETIC STAGES AND TECTONO-METAMORPHIC EVOLUTION OF PRECAMBRIAN FORMATIONS .....	46
N. E. Kozlov, N. O. Sorokhtin. POSSIBILITIES AND CONSTRAINTS OF PETROGEOCHEMICAL METHODS IN THE STUDY OF PRECAMBRIAN COMPLEX EVOLUTION HISTORY .....	50
V. M. Kozlovsky, V. V. Travin, T. F. Zinger, E. B. Kurdyukov, M. A. Yakushik. ARCHEAN CHARNOCKITE–ENDERBITE COMPLEX IN THE WHITE SEA AREA: ORIGIN AND MELT GENERATION SETTINGS .....	55

E. Kh. Korish, K. A. Savko, E. B. Sal'nikova, A. V. Samsonov, A. A. Ivanova, A. N. Larionov, S. V. Tsybulyaev. PALEOPROTEROZOIC DIORITE-GRANODIORITE MAGMATISM OF THE KURSK BLOCK OF SARMATIA: DECIPHERING TIME-ADJACENT GEOLOGICAL EVENTS . . . . .	60
A. A. Kravchenko, G. S. Anisimova, V. I. Beryozkin, N. V. Popov, E. E. Loskutov, A. I. Zhuravlev. GEOLOGY AND METALLOGENIC SPECIALIZATION OF PALEOPROTEROZOIC GRANULITE COMPLEXES IN THE NORTH OF THE ALDAN-STANOVY SHIELD . . . . .	64
N. M. Kudryashov, E. V. Galeeva, O. V. Udoratina, A. A. Kalinin, M. Grove. THE ARCHEAN STAGE OF RARE-METAL (Li, Cs) PEGMATITE FORMATION IN THE NORTH-EASTERN PART OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD . . . . .	68
I. I. Likhanov. ANOROGENIC MAGMATISM OF THE YENISEY RIDGE: EVIDENCE FOR BREAKUP OF SUPERCONTINENTS . . . . .	73
I. I. Likhanov. NEW EVIDENCE FOR THE GRENVILLE AND VALHALLA TECTONIC EVENTS AT THE WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON: THE CASE OF THE GAREVKA METACOMPLEX, YENISEY RIDGE . . . . .	77
I. I. Likhanov. RECONSTRUCTION OF P-T-t PATHS AND TECTONOMAGMATIC REASONS OF METAMORPHISM FOR COLLISION, EXTENSION, AND SHEAR ZONE GEODYNAMIC SETTINGS OF THE EARTH'S CRUST . . . . .	81
N. V. Lubnina, A. I. Slabunov, A. V. Stepanova, N. S. Nesterova. BELOMORIAN MOBILE BELT AS PART OF THE NUNA/COLUMBIA SUPERCONTINENT: NEW PALEOMAGNETIC AND GEOLOGICAL DATA . . . . .	85
O. A. Maksimov. P-T-T TRENDS IN THE METAMORPHIC TRANSFORMATION OF ECLOGITES IN THE GRIDINO COMPLEX OF THE BELOMORIAN PROVINCE (STOLBIKHA ISLAND AND SAMYLINO AREA) . . . . .	91
P. V. Medvedev. PRECAMBRIAN IRON FORMATIONS: PALEOECOLOGICAL AND PALEONTOLOGICAL ASPECTS . . . . .	95
S. V. Mezhelovskaya, A. D. Mezhelovskiy. WINDY BELT PALEOPROTEROZOIC STRUCTURE: UNRESOLVED ISSUES . . . . .	99
T. A. Myskova, A. S. Nikonova, K. A. Nikonov, I. A. Zhitnikova, P. A. Lvov. THE KICHAN ARCHEAN ISLAND-ARC SYSTEM (NEW GEOCHEMICAL AND ISOTOPE GEOCHRONOLOGY EVIDENCE) . . . . .	103
M. E. Petrakova, K. A. Savko, Sh. K. Baltybaev. MAGMATISM OF THE DON TERRANE OF THE VOLGA-DON OROGEN . . . . .	107
O. P. Polyansky, A. D. Nozhkin, E. V. Sokol, A. V. Babichev, A. N. Semenov. PSEUDOTACHYLITES OF THE MAIN ANABAR FAULT (ANABAR SHIELD): PETROLOGICAL-RHEOLOGICAL INDICATORS OF MELTING AND THE AGE OF DEFORMATIONS . . . . .	111
A. M. Pystin, Yu. I. Pystina, O. V. Grakova, N. S. Ulyasheva. AGE LIMITS OF THE UPPER PRECAMBRIAN SUBPOLAR AND POLAR URALS: TOWARDS THE TIMING OF THE TIMAN PASSIVE MARGIN FORMATION . . . . .	116
K. A. Savko, A. B. Kuznetsov, I. M. Vasilyeva, M. Yu. Ovchinnikova. ISOTOPE GEOCHEMISTRY EVIDENCE FOR GLOBAL CHANGES IN SARMATIA HYDROSPHERE COMPOSITION DURING THE PALEOPROTEROZOIC . . . . .	120



S. G. Skublov, A. V. Berezin, L. I. Salimgaraeva. RESULTS OF INTEGRATED DATING OF ECLOGITES OF THE BELOMORIAN MOBILE BELT . . . . .	124
A. I. Slabunov. ARCHAEOAN AND PALEOPROTEROZOIC OROGENS OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD: COMPARATIVE ANALYSIS OF ARCHITECTURE AND CRUSTAL EVOLUTION . . . . .	128
A. I. Slabunov, S. A. Svetov, A. V. Stepanova, P. V. Medvedev, A. K. Polin. A NEW TECTONIC MAP OF KARELIA: THE MAIN CONCEPT AND ITS APPLICATION . . . . .	132
A. I. Slabunov, A. V. Kervinen, N. S. Nesterova, A. V. Egorov, O. A. Maksimov, P. V. Medvedev. POLYCHRONOUS EVOLUTION OF NEOARCHEAN BANDED IRON FORMATION IN THE MAIN ORE SEQUENCE OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT: THE AGE OF ZIRCONS AND ACCESSORY MINERALS . . . . .	139
V. P. Sukhorukov, V. B. Savel'eva. STAGES AND AGE OF METAMORPHISM OF THE EASTERN PART OF KITOY BLOCK (SHARYZHALGAI UPLIFT, SIBERIAN CRATON) . . . . .	144
O. M. Turkina. ANALYSIS OF MANTLE SOURCES FOR MAFIC ASSOCIATIONS ON THE BASIS OF GEOCHEMICAL AND Nd ISOTOPIC DATA . . . . .	148
O. M. Turkina, A. E. Izokh, N. G. Berezhnaya. MANTLE EVOLUTION FROM ARCHAEOAN TO PALEOPROTEROZOIC: SYNTHESIS OF GEOCHEMICAL AND Nd ISOTOPIC DATA ON MAFIC ASSOCIATIONS FROM THE SOUTH-WEST SIBERIAN CRATON . . . . .	152
S. I. Turchenko. COMPARATIVE METALLOGENY OF THE ARCHAEOAN AND PROTEROZOIC STAGES IN THE GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE EARTH . . . . .	156
A. A. Shchipansky. COLLISIONAL OROGENESIS IN THE PALEOPROTEROZOIC ERA: TECTONICS OF NATURAL OROGENS VS. NUMERICAL MODELS . . . . .	160
CHRONICLE	
A. I. Slabunov, S. A. Svetov, A. V. Stepanova. Russian Precambrian Summit – to be continued . . . .	164
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS . . . . .	169

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра  
Российской академии наук**  
№ 5, 2022

ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

*Печатается по решению Ученого совета  
Федерального исследовательского центра  
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 8 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций<sup>12</sup>  
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева  
Компьютерная верстка Л. Э. Бюркланд

Подписано в печать 26.09.2022. Дата выхода 30.09.2022. Формат 60x84<sup>1/8</sup>.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 15,0. Усл. печ. л. 20,9.  
Тираж 100 экз. Заказ 734. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»  
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН  
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50