

УДК 550.93+552.16

ВОЗРАСТ И РТ-ПАРАМЕТРЫ РАННЕГО ЭТАПА МЕТАМОРФИЗМА ПОРОД АНГАРО-КАНСКОГО БЛОКА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

В. П. Сухоруков*, **О. М. Туркина**

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

Проведено изучение гранат-кордиеритовых гнейсов северо-восточной части Ангаро-Канского блока (Енисейский кряж), относящихся к Атамановской серии. Установлено, что РТ-параметры пика метаморфизма соответствуют гранулитовой фации при умеренном давлении ($T = 820$ °С, $P = 6$ кбар) и сопровождаются ретроградным РТ-трендом по часовой стрелке с изменением направления от околоизотермической декомпрессии до околоизобарического охлаждения при давлении около 3 кбар. Новые данные U-Pb SHRIMP и LA-ICP-MS датирования по циркону и монациту указывают на время гранулитового метаморфизма 1865 ± 5 млн лет. Данные о возрасте, метаморфических минеральных ассоциациях и микротекстурах свидетельствуют, что гранат-кордиерит-силлиманитовые гнейсы не были затронуты более поздним ультравысокотемпературным метаморфизмом (1,78–1,76 млрд лет), широко распространенным в Ангаро-Канском блоке. Таким образом, блок гранат-кордиерит-силлиманитовых гнейсов Атамановской серии можно рассматривать как фрагмент раннего гранулитового метаморфического комплекса. Полученные данные подтверждают двухэтапную историю метаморфизма Ангаро-Канского блока и указывают на коллизионное событие, произошедшее около 1,86 млрд лет назад и характерное для амальгамации Сибирского кратона. Этот метаморфический эпизод привел к вы熔влению большого объема постколлизионных гранитоидов и, вероятно, сыграл ключевую роль в подготовке коры к достижению условий УНТ в ходе последующего метаморфизма.

Ключевые слова: Сибирский кратон; Енисейский кряж; Ангаро-Канский блок; гранулиты; метаморфизм; палеопротерозой

Для цитирования: Сухоруков В. П., Туркина О. М. Возраст и РТ-параметры раннего этапа метаморфизма пород Ангаро-Канского блока (Енисейский кряж) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 154–158. doi: 10.17076/geo2169

Финансирование. Полевые работы проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (№ 122041400237-8), аналитические исследования – при поддержке РФФ (грант 21-77-20018-П).

V. P. Sukhorukov*, O. M. Turkina. AGE AND PT-PARAMETERS OF THE EARLY-STAGE METAMORPHISM OF THE ANGARA-KAN BLOCK (YENISEY RIDGE)

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

A study was conducted on garnet-cordierite gneisses from the northeastern part of the Angara-Kan block (Yenisey Ridge), which belong to the Atamanova Series. It was established that the peak metamorphic PT conditions corresponded to the granulite facies at moderate pressure ($T = 820\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 6\text{ kbar}$) and were followed by a clockwise retrograde P-T path. This path evolved from near-isothermal decompression to near-isobaric cooling at a pressure of around 3 kbar. New U-Pb SHRIMP and LA-ICP-MS age data for zircon and monazite indicates the timing of the granulite-facies metamorphism at $1865 \pm 5\text{ Ma}$. The age data, metamorphic mineral assemblages, and microtextures demonstrate that the garnet-cordierite-sillimanite gneisses were not affected by the later ultrahigh-temperature (UHT) metamorphic event (1.78–1.76 Ga), which was widespread across the Angara-Kan block. Consequently, the block of garnet-cordierite-sillimanite gneisses of the Atamanova Series can be considered as a fragment of an early granulite-facies metamorphic complex. The findings support the two-stage metamorphic history concept for the Angara-Kan block and indicate a collisional event at approximately 1.86 Ga, which is characteristic of the amalgamation of the Siberian Craton. This metamorphic episode led to the generation of a large volume of post-collisional granitoids and likely played a key role in preconditioning the crust to achieve UHT conditions during the subsequent metamorphic event.

Keywords: Siberian Craton; Yenisey Ridge; Angara-Kan block; granulites; metamorphism; Paleoproterozoic

For citation: Sukhorukov V. P., Turkina O. M. Age and PT-parameters of the early-stage metamorphism of the Angara-Kan block (Yenisey Ridge). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 154–158. doi: 10.17076/geo2169

Funding. The fieldwork was done under state assignment to the IGM SB RAS (No. 122041400237-8) with funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The analytical research was funded by the Russian Science Foundation (RSF), grant No. 21-77-20018-П.

Ангаро-Канский блок представляет собой выход палеопротерозойского Ангарского орогенного пояса, который протягивается вдоль западной окраины Сибирского кратона [Ножкин, Туркина, 1993; Rosen et al., 1994]. Канский гранулитовый комплекс подразделяется на кузеевскую и атамановскую толщи. Недавние исследования показали, что породы кузеевской серии были метаморфизованы в условиях ультравысокотемпературного метаморфизма, достигающего температуры 1070–1100 °С и давления 9–10 кбар [Туркина, Сухоруков, 2015; Sukhorukov et al., 2018, 2021; Сухоруков и др., 2018]. Его возраст оценивается в диапазоне 1,78–1,74 млрд лет, при этом породы содержат метаморфические цирконы более древнего возраста, около 1,86 млрд лет.

Метаморфические породы раннего этапа метаморфизма обнаружены в северной части Ангаро-Канского блока в бассейне р. Таловка. Они представлены мигматизированными гранат-кордиеритовыми гнейсами, состоящими из кварц-

полевошпатовой лейкосомы с гранатом и кордиеритом и обогащенной биотитом и гранатом меланосомы. Полная минеральная ассоциация гнейсов включает $\text{Grt}+\text{Crd}+\text{Sil}+\text{Bt}+\text{Pl}+\text{Kfs}+\text{Qz}+\text{Il}+\text{m}+(\text{And}+\text{Spl}+\text{Mt})$, акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом и монацитом.

По структурным признакам и по химическому составу в породе выделяются две генерации граната, кордиерита, биотита и силлиманита. Наиболее распространенные реакционные структуры включают: 1. Замещение граната (Grt1) кордиеритовыми каймами; 2. Рост каймы граната (Grt2) вокруг Grt1 ; 3. Замещение кордиерита (Crd1) симплектитом биотита (Bt2), андалузита и силлиманита (Sil2), иногда в ассоциации с Grt2 . Grt1 , Crd1 и Bt1 расположены в лейкосоме пород, гранат и кордиерит содержат включения силлиманита (Sil1).

Оценка PT-параметров метаморфизма выполнена с использованием традиционных геотермометров, программного комплекса TWQ и методом построения фазовых диаграмм

(псевдосечений). Полученные данные предполагают следующую метаморфическую историю. Пик метаморфизма ($T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 6,5\text{ кбар}$) сопровождался частичным плавлением с кристаллизацией перитектического граната и кордиерита. После достижения пиковых параметров произошло снижение давления до величин около до 3–4 кбар, после чего последовало субизобарическое остывание до температуры около $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1). Кристаллизация расплава, вероятно, происходила в области устойчивости силлиманита, а последующее остывание происходило в области андалузита, что привело к формированию сростаний обоих минералов с биотитом, замещающим ранние зерна кордиерита. Рост граната (Grt2) продолжался при охлаждении в области устойчивости как силлиманита, так и андалузита. Кордиеритовые каймы вокруг Grt1 могут быть индикатором декомпрессионной части РТ-траектории, тогда как кристаллизация каем Grt2 на границе между Grt1 и Crd2 указывает на изменение направления РТ-тренда от почти изотермической деком-

прессии к почти изобарическому охлаждению (рис. 1).

Для оценки возраста метаморфизма было проведено U-Pb-датирование методом LA-ICP-MS циркона и монацита из гранат-биотитовых гнейсов.

Позднепалеопротерозойский циркон образует самую многочисленную популяцию и главный максимум на вероятностной диаграмме в 1,87 млрд лет (рис. 2). Цирконы представлены как магматическими осцилляционными зональными зернами, так и незональными каймами метаморфического происхождения. Зерна монацита изометричные или неправильной формы, большинство из них имеют однородную структуру. Большинство анализов показали некоторую дискордантность. Верхнее пересечение изохроны 1823 ± 30 млн лет соответствует возрасту кристаллизации монацита. Новые данные U-Pb-возраста циркона, полученные для изученных гнейсов, указывают на пик гранулитового метаморфизма в 1865 ± 5 млн лет, тогда как U-Pb-возраст монацита около 1823 ± 30 млн лет, вероятно, соответствует ретроградной стадии.

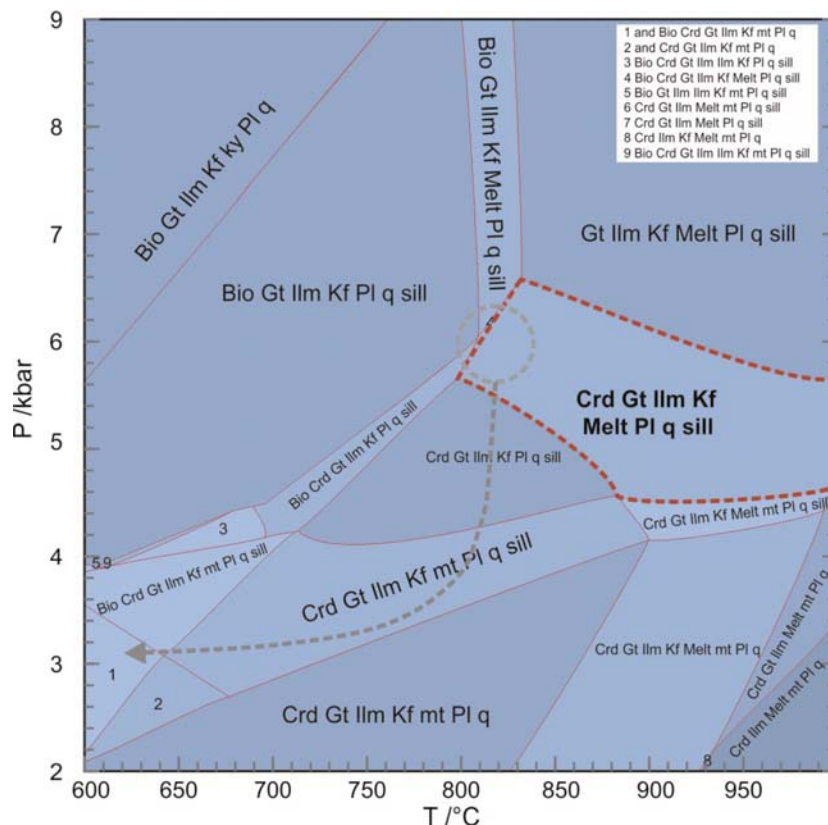


Рис. 1. Результат моделирования фазовых равновесий на основании состава гранат-кордиерит-силлиманитового гнейса

Fig. 1. Phase equilibria modelling results based on the bulk rock composition of the garnet-cordierite-sillimanite gneiss

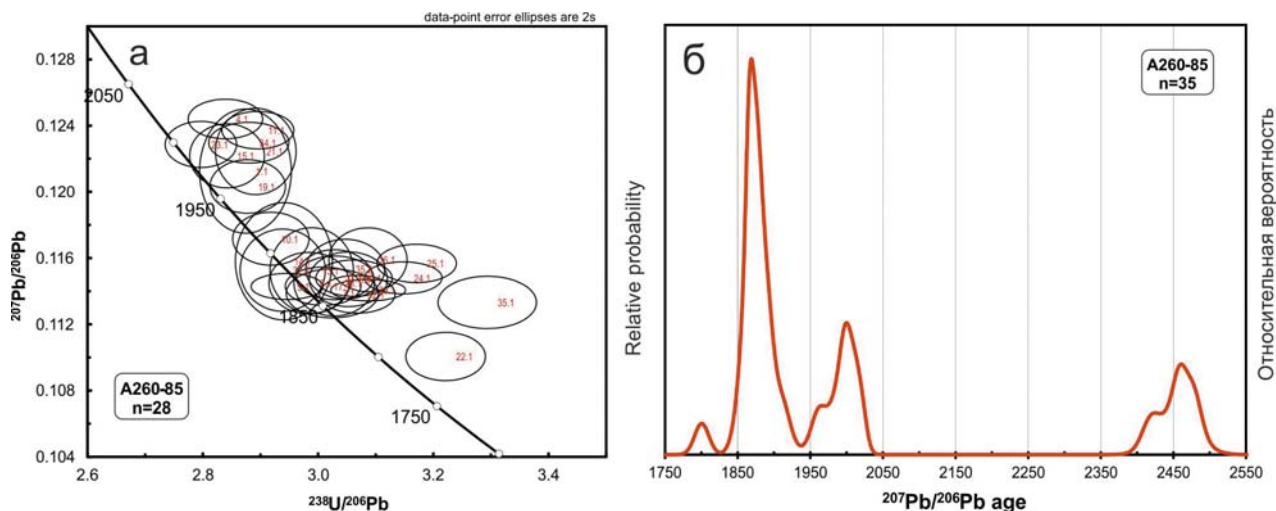


Рис. 2. U-Pb-диаграмма Терра – Вассербурга (а) и диаграмма относительной вероятности (б) возраста цирконов из образца гранат-кордиерит-силлиманитового гнейса

Fig. 2. U-Pb Terra-Wasserburg diagram (a) and relative probability curve (b) of zircon from the garnet-cordierite-sillimanite gneiss

Выводы

1. Гранат-кордиеритовые гнейсы северной части Ангаро-Канского блока метаморфизованы в условиях гранулитовой фации ($T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 6\text{ кбар}$). Ретроградный РТ-тренд метаморфизма характеризуется изменением направления от преимущественно декомпрессионного к почти изобарическому охлаждению и завершению в поле стабильности андалузита.

2. Полученные данные о возрасте циркона (1,86 млрд лет) и монацита (1,83 млрд лет) указывают на то, что эти гнейсы не были затронуты поздним УНТ-метаморфизмом (1,75–1,78 млрд лет), широко распространенным в пределах Ангаро-Канского блока.

3. Все полученные данные позволяют рассматривать гранулитовый метаморфизм 1,86 млрд лет как отдельное метаморфическое событие с пиковыми и ретроградными стадиями, а не как часть УНТ-метаморфизма в пределах Ангаро-Канского блока.

Литература

Ножкин А. Д., Туркина О. М. Геохимия гранулитов Канского и Шарышалгайского комплексов. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1993. 219 с.

Сухоруков В. П., Туркина О. М., Гладкочуб Д. П. Первая находка сапфирина в гранулитах Ангаро-Канского блока: свидетельство ультравысокотемпературного метаморфизма на юго-западе Сибирского кратона // ДАН. 2018. Т. 479, № 5. С. 546–550. doi: 10.7868/S0869565218110154

Туркина О. М., Сухоруков В. П. Возрастные рубежи и условия метаморфизма мафических

гранулитов в раннедокембрийском комплексе Ангаро-Канского блока (юго-запад Сибирского кратона) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 11. С. 1961–1986. doi: 10.15372/GiG20151104

Rosen O. M., Condie K. C., Natapov L. M., Nozhkin A. D. Archaean and Early Proterozoic evolution of the Siberian Craton: a preliminary assessment // *Archaean Crustal Evolution* / K. C. Condie (ed.). Amsterdam: Elsevier, 1994. P. 411–459.

Sukhorukov V. P., Turkina O. M., Tessalina S., Talavera C. Sapphire-bearing Fe-rich granulites in the SW Siberian Craton (Angara-Kan block): implications for Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism // *Gondwana Res.* 2018. Vol. 57. P. 26–47. doi: 10.1016/j.gr.2017.12.012

Sukhorukov V. P., Turkina O. M., Tessalina S., Talavera C. Orthopyroxene-sillimanite granulites of the Angara-Kan block (SW Siberian Craton): constraints on timing of UHT metamorphism // *J. Asian Earth Sci.* 2021. Vol. 207. Art. 104650. doi: 10.1016/j.jseae.2020.104650

References

Nozhkin A. D., Turkina O. M. Geochemistry of granulites from Kansk and Sharyzhgaysk complexes. Novosibirsk: UIGGM; 1993. 219 p. (In Russ.)

Rosen O. M., Condie K. C., Natapov L. M., Nozhkin A. D. Archaean and Early Proterozoic evolution of the Siberian Craton: a preliminary assessment. *Archaean Crustal Evolution*. Amsterdam: Elsevier; 1994. P. 411–459.

Sukhorukov V. P., Turkina O. M., Gladkochub D. P. The first finding of sapphire in granulites of the Angara-Kan block: evidence of ultra-high temperature metamorphism in the SW Siberian Craton. *Dokl. Earth Sci.* 2018;479(2):443–447. doi: 10.7868/S0869565218110154

Sukhorukov V. P., Turkina O. M., Tessalina S., Talavera C. Sapphirine-bearing Fe-rich granulites in the SW Siberian Craton (Angara-Kan block): implications for Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism. *Gondwana Res.* 2018;57:26–47. doi: 10.1016/j.gr.2017.12.012

Sukhorukov V. P., Turkina O. M., Tessalina S., Talavera C. Orthopyroxene-sillimanite granulites of the

Angara-Kan block (SW Siberian Craton): constraints on timing of UHT metamorphism. *J. Asian Earth Sci.* 2021;207:104650. doi: 10.1016/j.jseaes.2020.104650

Turkina O. M., Sukhorukov V. P. Stages and conditions of metamorphism of mafic granulites in the Early Precambrian complex of the Angara-Kan terrane (southwestern Siberian Craton). *Russ. Geol. Geophys.* 2015;56:1544–1567. doi: 10.15372/GiG20151104

Поступила в редакцию / received: 29.07.2025; принята к публикации / accepted: 23.12.2025.
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
лаборатории прогнозно-металлогенических
исследований

e-mail: svp@igm.nsc.ru

Туркина Ольга Михайловна

д-р геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
лаборатории петрологии и рудоносности
магматических формаций

e-mail: turkina@igm.nsc.ru

CONTRIBUTORS:

Sukhorukov, Vasiliy

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

Turkina, Olga

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