

УДК 549.753.1

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕКОВОГО ДАТИРОВАНИЯ АПАТИТА С ПРИМЕНЕНИЕМ LA–ICP–MS ИЗ КРОВЛИ ФУНДАМЕНТА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (НЕПСКО-БОТУОБИНСКАЯ АНТЕКЛИЗА)

© 2023 г. Т. Э. Багдасарян^{1,2}, А. В. Гайдук³, В. Б. Хубанов⁴,
А. В. Латышев^{1,2}, Р. В. Веселовский^{1,2,*}

Представлено академиком РАН Л. Н. Когарко 21.01.2023 г.

Поступило 13.02.2023 г.

После доработки 27.02.2023 г.

Принято к публикации 28.02.2023 г.

Представлены первые результаты трекового датирования апатита (АФТ) из керна скважин, вскрывших кровлю кристаллического фундамента Сибирской платформы в Непско-Ботуобинской антеклизе, выполненного с использованием масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA–ICP–MS). Трековые возрасты апатита определены для 9 проб с глубин ~2 км и формируют три возрастные группы со средними значениями 200, 140 и 60 млн лет. Термальное событие с возрастом ~200 млн лет имеет широкое распространение в пределах практически всей Сибирской платформы и отражает этап ее раннеюрского интенсивного воздымания. Переустановка трековой системы в апатите ~140 млн лет назад соотносится с тектоно-термальными событиями, маркирующими заключительный этап коллизии Монголо-Охотского складчатого пояса. Наиболее молодые значения трекового возраста ~60 млн лет, с одной стороны, могут отражать начало байкальского рифтогенеза, а с другой — являться следствием высокого содержания урана в апатите.

Ключевые слова: трековое датирование, апатит, LA–ICP–MS, термохронология, геохронология, Сибирская платформа, термальная эволюция, фундамент, тектоника

DOI: 10.31857/S2686739723600248, **EDN:** UKOOMQ

ВВЕДЕНИЕ

Породы кристаллического фундамента древних платформ служат источником уникальных сведений об их тектонической истории и эволюции магматических процессов. Методы низкотемпературной термохронологии способны выявлять этапы нагрева и охлаждения горных пород в интервале 40–300°C и дают возможность для реконструкции тектоно-термальной эволюции верхних горизонтов земной коры с высокой детальностью. При решении подобного рода задач метод трекового датирования апатита является одним из наиболее востребованных: он позволяет оценить время, прошедшее с момента последнего

остывания пород ниже 120°C. Это время может являться отражением как вторичного прогрева пород фундамента под влиянием магматических процессов, так и скорости денудации вследствие вертикальных тектонических движений.

Определения трекового возраста апатита, выполненные по породам фундамента или магматическим комплексам Сибирской древней платформы, весьма немногочисленны. Первые данные, полученные по керну вошедших в фундамент ее северо-восточной части скважин [1], позволили предположить относительно непростую термальную историю Сибирской платформы в мезозое: наличие трековых датировок апатита со значениями ~200 млн лет авторы упомянутой работы объяснили формированием крупной подкоровой интрузии (андерплейта) во время излияния Сибирских пермо-триасовых траппов. Результаты трекового анализа апатита из интрузивных тел Сибирской трапповой провинции [2, 3] подтвердили полученные ранее результаты, а в качестве альтернативной интерпретации широкого распространения трековых возрастов ~200 млн лет было предложено событие регионального масштаба, связанное с тектоническим воздыманием всей

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

³ООО “Энерджи Ресерч”, Москва, Россия

⁴Геологический институт им. Н. Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: roman.veselovskiy@ya.ru

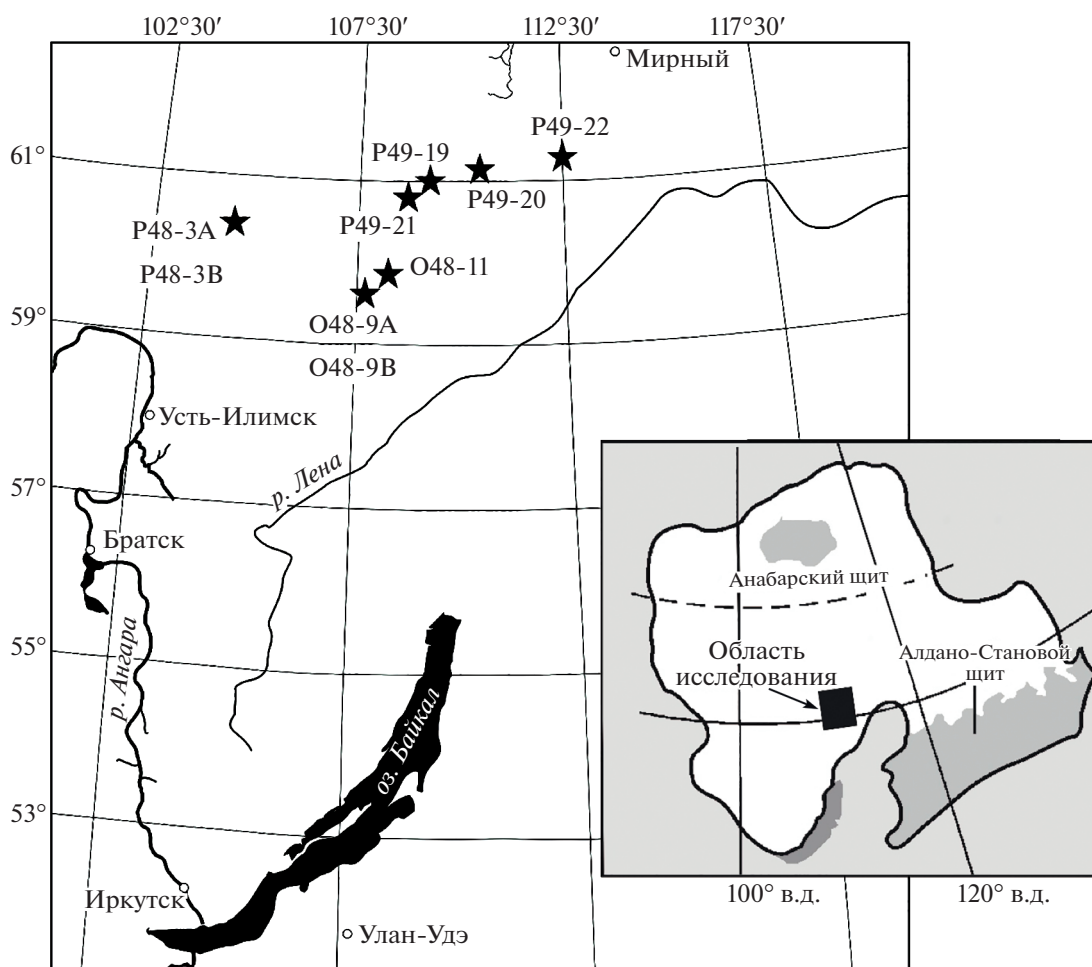


Рис. 1. Район исследований и места отбора образцов для трекового датирования апатита из скважин в пределах Непско-Ботубинской антеклизы (показаны звездами).

Сибирской платформы в позднем триасе и ранней юре. Таким образом, разработка модели тектоно-термальной эволюции Сибирской платформы является актуальной задачей современной геологии, решение которой необходимо для выявления, оценки продолжительности и масштаба тектонических и магматических событий в ее геологической истории.

Изучение геологического строения и тектоно-термальной эволюции пород кристаллического фундамента Сибирской платформы в пределах Непско-Ботубинской антеклизы имеет важное прикладное значение, поскольку именно эти данные определяют перспективность структур осадочного чехла для поисков новых месторождений углеводородов. Для решения этой задачи нами был собран уникальный скважинный материал, представляющий месторождения нефти и газа, а также поисковые лицензионные участки в пределах Непско-Ботубинской антеклизы.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Монофракция апатита для трекового датирования была выделена из керна пород кристаллического фундамента Сибирской платформы, отобранного с глубин 1800–2600 м в поисково-разведочных скважинах, пробуренных на углеводородное сырье и характеризующих северную, западную и центральную части Непско-Ботубинской антеклизы (рис. 1). Скважины распределены вдоль субширотного профиля протяженностью более 500 км.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подсчет плотностей, диаметров треков и длин скрытых треков выполнялись в Центре коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ЦКП ИФЗ) РАН (г. Москва) [4] вручную на микроскопе Olympus BX53M. Концентрации F и Cl в апатите, определяющих кинетические параметры отжига треков [5], оценивались в ЦКП ИФЗ РАН с использованием

Таблица 1. Результаты трекового датирования апатита с использованием LA–ICP–MS

	Номер образца	Глубина отбора керна, м	Порода	Число зерен	Плотность треков ($\times 10^6$ треков см^{-2}) (Число треков)	Содержание урана (ppm)	$\zeta_{\text{ICP}} \pm 2\sigma$	Возраст (млн лет) ($\pm 2\sigma$) (Pooled age)
1	P48-3A	2560.3	Гранит	15	3.93 (942)	32.70	0.60 ± 0.04	179.3 ± 34.8
2	P48-3B	2560.3	Гранит	57	2.03 (1855)	18.00		195.2 ± 19.6
3	P49-19	2044.9	Гранит	101	1.52 (2453)	14.30		203.4 ± 15.7
4	P49-20	2058.2	Гранодиорит	39	1.03 (642)	29.80		59.4 ± 6.4
5	P49-21	1933.9	Гнейс	76	1.11 (1348)	33.20		62.3 ± 5.9
6	P49-22	1935.0	Гранит	100	2.60 (4161)	19.87		230.8 ± 18.7
7	O48-9A	2000.4	Гнейс	58	0.92 (868)	10.91		146.4 ± 16.8
8	O48-9B	2000.4	Гнейс	95	0.99 (1493)	15.20		121.4 ± 19.2
9	O48-11	1820.4	Милонитизированный гранит	67	0.60 (652)	7.51		145.2 ± 27.6

Примечание. ζ_{ICP} – зета-фактор, подсчитанный в результате зета-сессии согласно протоколу [6].

сканирующего электронного микроскопа “Tescan” MIRA LMS с ЭДС-детектором. Измерение концентрации урана выполнялось в ЦКП “Геоспектр” Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (г. Улан-Удэ) на масс-спектрометре высокого разрешения ICP-MS Element XR с установкой лазерной абляции UP-213 “NewWave” по протоколу [6].

Полученные трековые возрасты апатита представлены в табл. 1 и на рис. 2. Согласно современной методике, надежными считаются те значения трекового возраста, которые получены при подсчете треков спонтанного деления ^{238}U в не менее чем 20 зернах, т.е. все полученные нами определения, кроме возраста образца P48-3A, являются надежными.

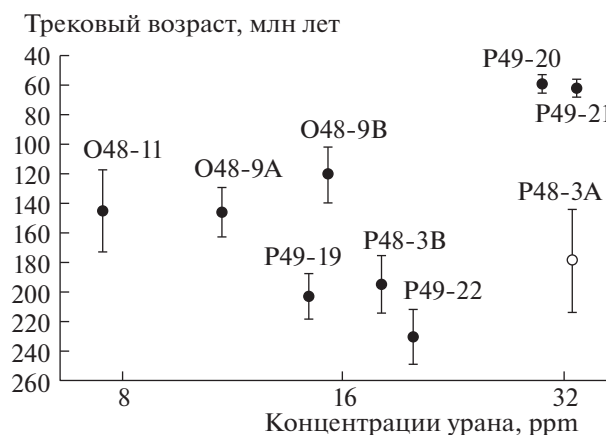


Рис. 2. Зависимость трекового возраста апатита от концентрации урана. Погрешности приведены на уровне 2σ . Черные кружки обозначают надежные оценки трекового возраста; белый кружок (проба P48-3A) – ненадежное определение возраста.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные трековые возрасты образуют три кластера (рис. 2): 1) поздний триас—ранняя юра (230.8—179.3 млн лет); 2) конец поздней юры—ранний мел (149.9—121.4 млн лет); и 3) палеоцен (62.3—59.4 млн лет). Анализ химического состава апатита из исследованных образцов свидетельствует, что во всех образцах он представлен фторапатитом с близкими составами без примеси хлора. Несмотря на значительные доверительные интервалы некоторых, в первую очередь древних датировок, группы значений трекового возраста могут быть соотнесены во времени со следующими тектоническими событиями на Сибирской платформе и в ее складчатом обрамлении.

Позднетриасово—раннеюрский кластер совпадает с большей частью трековых возрастов, полученных ранее по Сибирской платформе [1–3]. Согласно нашей интерпретации, эти датировки маркируют региональный этап воздымания и эрозии на всей Сибирской платформе, который проявился синхронно с деформациями на Таймыре [12] и в Монголо-Охотском складчатом поясе [3].

Позднеюрско—раннемеловые трековые возрасты могут являться отражением остывания пород фундамента южной части Сибирской платформы на этапе тектонической активизации синхронной с коллапсом Монголо-Охотского орогена и масштабным растяжением, охватившем Центральную и Восточную Азию [7], а также этапа внутриплитного вулканизма в Забайкалье [8].

Интерпретация палеоценовых значений трекового возраста апатита на настоящий момент представляется наиболее спорной. Эти определения одновозрастны с таковыми для пород Приморского [9] и Баргузинского [10] хребтов и, возможно, могут фиксировать остывание пород фундамента после инициального этапа байкальского рифтогенеза [11]. С другой стороны, присутствие триас-юрских (например, проба Р49-19) и палеоценовых (пробы Р49-20 и Р49-21) трековых возрастов в соседних близко расположенных скважинах может рассматриваться или как следствие блокового строения фундамента, или быть связано с высокими концентрациями урана в пробах с молодыми возрастными (рис. 2). Решение этого вопроса требует проведения дополнительных термохронологических исследований на юге Сибирской платформы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены при поддержке гранта РФФИ № 20-35-90066 и тем государственного задания ИФЗ РАН и ГИН СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розен О.М., Соловьев А.В., Журавлев Д.З. Термальная эволюция северо-востока Сибирской платформы в свете данных трекового датирования апатитов из керна глубоких скважин // *Физика Земли*. 2009. № 10. С. 79–96.
2. Мышенкова М.С., Зайцев В.А., Томсон С., Латышев А.В., Захаров В.С., Багдасарян Т.Э., Веселовский Р.В. Термальная история Гулинского плутона (север Сибирской платформы) по результатам трекового датирования апатита и компьютерного моделирования // *Геодинамика и тектонофизика*. 2020. Т. 11 (1). С. 75–87.
<https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-1-0464>
3. Bagdasaryan T.E., Thomson S.N., Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Zaitsev V.A., Marfin A.E., Zakharov V.S., Yudin D.S. Thermal history of the Siberian Traps Large Igneous Province revealed by new thermochronology data from intrusions // *Tectonophysics*. 2022. V. 836. 229385.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229385>
4. Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud'ko D.V., Chistyakova A.V. Shared research facilities “Petrophysics, geomechanics and paleomagnetism” of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. V. 13 (2). 579.
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>
5. Carlson W.D., Donelick R.A., Ketcham R.A. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: I. Experimental results // *American Mineralogist*. 1999. V. 84. № 9. P. 1213–1223.
<https://doi.org/10.2138/am-1999-0901>
6. Cogné N., Chew D.M., Donelick R.A., Ansberque C. LA-ICP-MS apatite fission track dating: a practical zeta-based approach // *Chemical Geology*. 2020. V. 531. P. 119302.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119302>
7. Wang T., Guo L., Zheng Y., Donskaya T., Gladkochub D., Zeng L., Li J., Wang Y., Mazukabzov A. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes // *Lithos*. 2012. V. 154. P. 315–345.
8. Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Комарицына Т.Ю. Позднемезозойский-кайнозойский рифтогенный магматизм Удинского сектора (Западное Забайкалье) // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 5. С. 920–946.
9. Van der Beek P., Delvaux D., Andriessen P.A.M., Levi K.G. Early Cretaceous denudation related to convergence tectonics in the Baikal region, SE Siberia // *J. Geol. Soc.* 1996. V. 153. P. 515–523.
10. Jolivet M., De Boisgrollier T., Petit C., Fournier M., Sankov V.A., Ringenbach J.C., Byzov L., Miroshnichenko A.I., Kovalenko S.N., Anisimova S.V. How old is the Baikal Rift Zone? Insights from apatite fission track thermochronology // *Tectonics*. 2009. V. 28. TC3008.

11. *Ivanov A.V., Demonterova E.I., He H., Perepelov A.B., Travin A.V., Lebedev V.A.* Volcanism in the Baikal rift: 40 years of active-versus-passive model discussion // *Earth-Science Reviews*. 2015. V. 148. P. 18–43.
12. *Khudoley A.K., Verzhbitsky V.E., Zastrozhnov D.A., O'Sullivan P., Ershova V.B., Proskurnin V.F., Tchkova M.I., Rogov M.A., Kyser T.K., Malyshev S.V., Schneider G.V.* Late Paleozoic – Mesozoic tectonic evolution of the Eastern Taimyr-Severnaya Zemlya Fold and Thrust Belt and adjoining Yenisey-Khatanga Depression // *Journal of Geodynamics*. 2018. V. 119. P. 221–241.

FIRST LA-ICP-MS APATITE FISSION-TRACK AGES FROM THE SIBERIAN PLATFORM BASEMENT (NEPSKO-BOTUOBINSKAYA ANTECLISE)

T. E. Bagdasaryan^{a,b,#}, A. V. Gayduk^c, V. B. Khubanov^d, A. V. Latyshev^{a,b}, and R. V. Veselovskiy^{a,b}

^a*Lomonosov Moscow State University, Geological faculty, Moscow, Russian Federation*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c*“Energy Research” LLC, Moscow, Russian Federation*

^d*Dobretsov Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Ulan-Ude, Russian Federation*

[#]*E-mail: roman.veselovskiy@ya.ru*

Presented by Academician of the RAS L.N. Kogarko January 21, 2023

We present the first results of LA-ICP-MS apatite fission-track dating (AFT) from nine core samples from wells, that exposed the top of the crystalline basement of the Siberian platform within the Nepsko-Botuo-binskaya anteklise on the ~2 km depth. Obtained AFT ages belong to three clusters with mean values of 200, 140, and 60 Ma. A thermal event of ~200 Ma is widespread throughout almost the entire Siberian platform and reflects the stage of its Early Jurassic uplift. Reset of the fission-track geochronometer in apatite ~140 Ma correlates with tectono-thermal event marking the final stage of the Mongol-Okhotsk fold belt collision. The youngest AFT ages of ~60 Ma, on the one hand, may reflect the early (crypto) stage of the Baikal rifting, and, on the other hand, be a consequence of the high content of uranium in apatite.

Keywords: fission-track dating, apatite, LA-ICP-MS, thermochronology, geochronology, Siberian platform, thermal evolution, basement, tectonics