

УДК 551.24:550.93

## ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ АНГАРО-ВИТИМСКОГО ГРАНИТОИДНОГО БАТОЛИТА КАК ЛЕТОПИСЬ ЭВОЛЮЦИИ МОНГОЛО-ОХОТСКОГО ОРОГЕНА

© 2023 г. А. В. Травин<sup>1,2,\*</sup>, М. М. Буслев<sup>1</sup>, Ю. А. Бишаев<sup>1</sup>, А. А. Цыганков<sup>3,4</sup>

Представлено академиком РАН В. В. Ярмолюком 17.10.2022 г.

Поступило 17.10.2022 г.

После доработки 01.11.2022 г.

Принято к публикации 02.11.2022 г.

Для позднепалеозойских гранитоидов Ангаро-Витимского батолита (АВБ) на основе комплексного подхода, включающего U/Pb-, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar- и трековый методы датирования, реконструирована термическая история. Исследованы породы баргузинского, чивыркуйского комплексов на участках в юго-западной, северо-восточной частях батолита, а также на полуострове Святой нос и восточном берегу озера Байкал. Термохронологические данные для пород всех участков в целом согласуются между собой, располагаясь на одной кривой. Быстрое охлаждение на графике сразу после формирования пород АВБ свидетельствует об эпохе интенсивной денудации с амплитудой порядка 7–5 км, связанной с позднепалеозойской орогенцией. После эпохи тектонической стабилизации, характеризующейся постепенным закрытием изотопной системы биотита в интервале 170–295 млн лет, происходит закрытие изотопной системы полевого шпата в узком интервале 140–167 млн лет. Этот интервал совпадает с закрытием Монголо-Охотского океана и началом формирования одноименного орогена и характеризуется амплитудой денудации около 3 км. Далее, в период 60–3 млн лет на территории Забайкалья происходила медленная денудация, закончившаяся относительно резким охлаждением пород в течение последних 3 млн лет и денудацией с амплитудой порядка 3–2 км. Это может быть связано с откликом на тектоническое воздействие Индо-Евразийской коллизии. Полученные данные о тектоно-термальной эволюции пород АВБ могут послужить основой для сопоставления с динамикой формирования Монголо-Охотского орогена с одной стороны, с другой – динамикой осадконакопления в юрско-раннемеловых Иркутском, Канско-Ачинском, Тувинском, Кузнецком и Западно-Сибирском бассейнах.

*Ключевые слова:* U/Pb-датирование, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-датирование, трековое датирование, термохронологические реконструкции, гранитоидные батолиты, Монголо-Охотский ороген, денудация

DOI: 10.31857/S2686739722602447, EDN: SVOGTN

При реконструкции эволюции орогенов, к числу которых относится мезозойский Монголо-Охотский ороген, наряду с прямыми исследованиями осадочных комплексов, активных разломов и форм рельефа (например, [1]), актуальным является изучение термической истории магматических пород. Изучение включает использование

комплекса геохронологических методов, характеризующихся различными температурами закрытия изотопных систем минералов: от U/Pb-датирования циркона (температура закрытия  $T_c \sim 900^\circ\text{C}$ ), <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-датирования амфибола ( $T_c \sim 550^\circ\text{C}$ ), <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-датирования биотита ( $T_c \sim 320^\circ\text{C}$ ), полевого шпата/плагиоклаза ( $T_c \sim 300^\circ\text{C}$ ), до трекового датирования апатита ( $T_c \sim 110^\circ\text{C}$ ) [2]. Сопоставление фиксируемых значений возраста изотопных систем минералов с температурами их закрытия позволяет оценить последовательно глубины залегания пород (учитывая усредненный температурный градиент в 25–30°/км) на различных промежутках времени, начиная от их формирования и заканчивая выводом к земной поверхности в результате тектонических событий. Такой мультисистемный подход использован нами для изучения тектоно-термальной эволюции позднепалеозойских гранитоидов Ангаро-Витимского

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический  
университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт Сибирского отделения  
Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

<sup>4</sup>Бурятский государственный университет,  
Улан-Удэ, Россия

\*E-mail: travin@igm.nsc.ru

батолита (АВБ), расположенного на юго-восточной окраине Северо-Азиатского континента [3]. В мезозое ([1, 4–6] и другие) Северо-Азиатский континент, включая и рассматриваемый Забайкальский сегмент, претерпел интенсивную тектоническую реактивацию (начавшуюся около 180 млн лет назад), связанную с закрытием Монголо-Охотского океанического бассейна и последующей коллизией Северо-Китайского континента. В результате был сформирован мезозойский Монголо-Охотский орогенный пояс, сутурная зона которого протягивается на расстояние свыше 3000 км от Центральной Монголии через Забайкалье, Восточную Монголию и Приамурье до Охотского моря.

С целью выявления влияния мезозойских событий на термическую историю пород АВБ, а также – реконструкции истории их вывода к поверхности рассмотрены результаты комплексного U/Pb-,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ - и трекового датирования образцов баргузинского и чивыркуйского комплексов батолита на трех ключевых участках батолита: а) в юго-западной части, б) на полуострове Святой нос, восточном берегу оз. Байкал, в) в северо-западной части (рис. 1).

Формирование магматических комплексов региона, включая АВБ, связывается с субдукционным процессом и возможным вкладом обогащенных мантийных источников [3]. По данным [7–12] специфика позднепалеозойского магматизма Забайкалья определяется совмещением мантийного плюма с завершающей стадией герцинской орогении. Показано, что становление интрузий региона происходило на глубинах 20–13 км 320–290 млн лет назад на коллизионной (10%), и 310–280 млн лет назад – на постколлизионной (90%) стадиях развития территории.

Сводка опубликованных [7–12] и новых данных изотопного и трекового датирования приведена на термохронологической диаграмме (рис. 2). Характерно, что для пород юго-западного, восточного и северо-восточного изученных участков реконструируется в целом одинаковая термическая история.

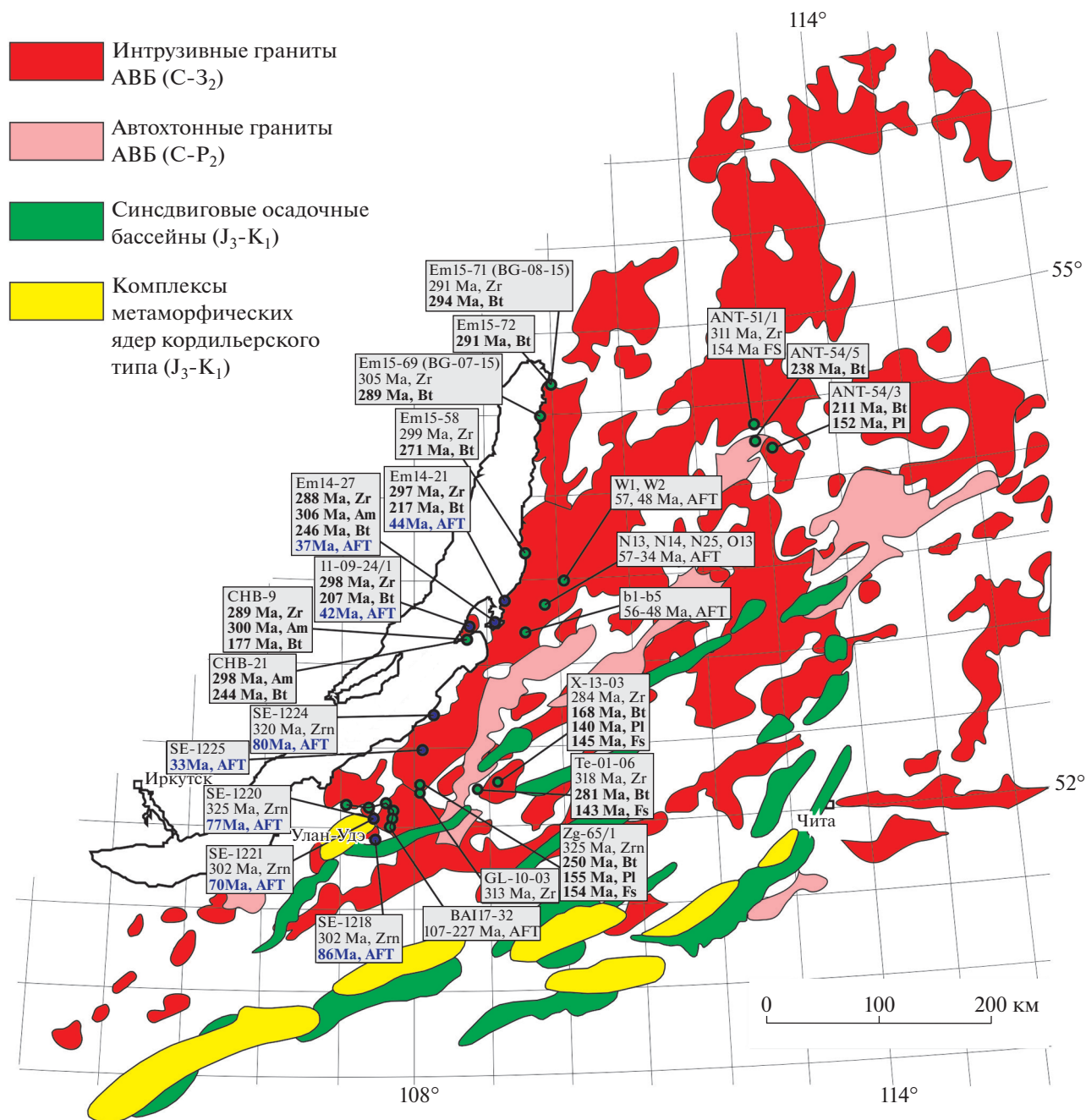
Значения  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраста, полученные по роговой обманке, попадают в возрастной диапазон формирования гранитоидов (310–290 млн лет), фиксируемый U/Pb-методом по циркону (рис. 2). Это позволяет считать, что глубина формирования изученных пород не превышала 15 км, что согласуется с представлениями, основанными на геологических данных [7, 8, 11, 12]. В северо-восточной части АВБ практически сразу (рис. 1, 2), учитывая возраст закрытия изотопных систем биотита, произошло остывание гранитоидов до интервала температур 300–350°C. Это соответствует глубинам 10–7 км, принимая усредненный температурный градиент в 30°/км. Кру-

тое положение графика термической истории для некоторых пород АВБ в этот период времени свидетельствует о крупной эпохе денудации, связанной с позднепалеозойской орогенией. Амплитуда денудации оценивается по разнице между глубинами, при которых происходит закрытие роговой обманки, и биотита, что составляет 7–5 км. Столь существенная денудация территории Забайкалья может быть связана с крупной тектонической фазой, которая отчетливо проявилась в покровно-сдвиговых структурах Восточного Саяна, расположенных вблизи и к востоку от оз. Байкал, а в целом – на огромной территории Алтае-Саяна и Восточного Казахстана [13, 14]. В Восточных Саянах Главный Саянский разлом, проявленный как правосторонний сдвиг, ассоциирует с покровными структурами Тункинских Гольцов и, по данным  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования синтетектонических минералов, характеризуется позднекарбонно-раннепермским возрастом формирования (316–286 млн лет), который полностью совпадает с фиксируемым ранним эпизодом вывода к поверхности пород АВБ (рис. 2).

Далее, в период 290–180 млн лет, породы АВБ находились в температурном интервале 250–350°C, в котором изотопные системы амфибола были полностью закрыты (рис. 2), при этом в различных частях батолита происходило растянутое во времени закрытие изотопной системы биотита. Пологое поведение графика термической истории пород свидетельствует в пользу тектонической стабилизации в регионе в этот период времени.

Закрытие изотопных систем полевого шпата/плагиоклаза ( $T_c \sim 250\text{--}200^\circ\text{C}$ ) начинает фиксироваться в интервале 170–140 млн лет (поздняя юра–ранний мел). Разница значений температур около 100°C между закрытием изотопной системы биотита и полевого шпата может быть объяснена тем, что породы АВБ в это время испытали денудацию около 3 км мощности, которая по времени совпадает с закрытием Монголо-Охотского океана и началом формирования одноименного орогена [1, 4–6]. Крутое положение графика (рис. 2) в период 140–125 млн лет между температурой закрытия изотопной системы полевой шпат/плагиоклаз и трековым возрастом апатита (разница значений температур 150–100°C) свидетельствует о продолжающемся формировании Монголо-Охотского орогена, в результате роста которого было подвержено денудации еще около 4–3 км мощности пород.

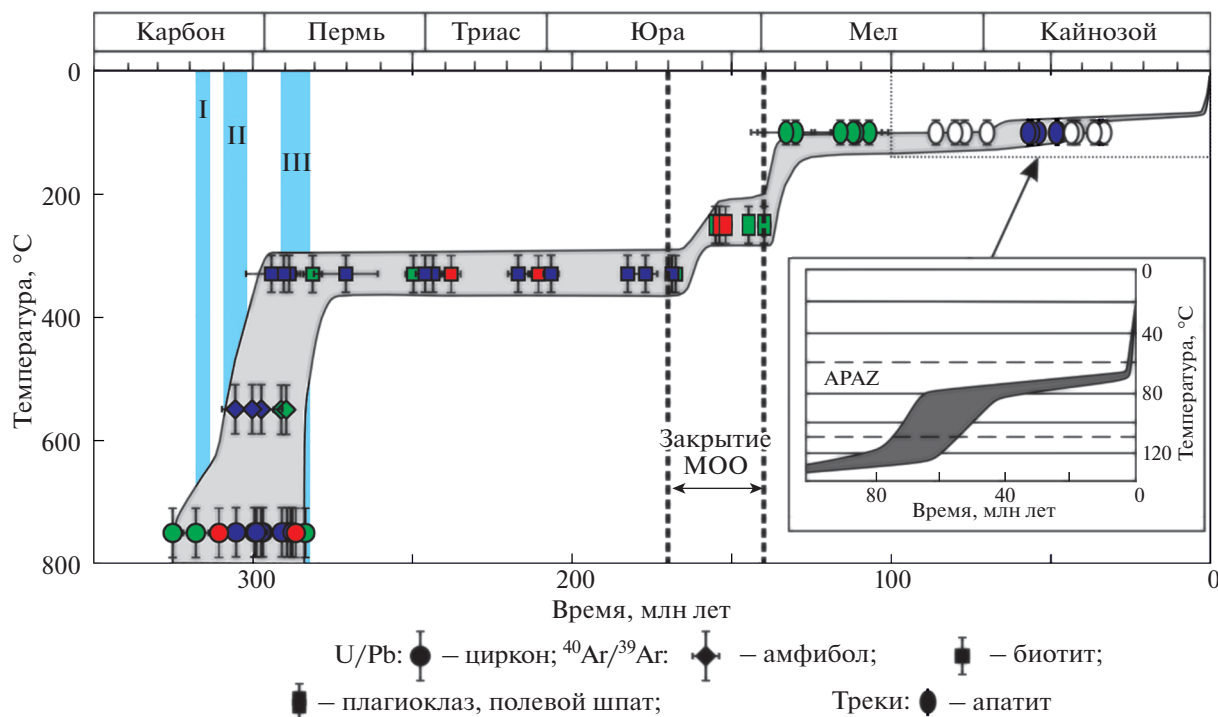
В период 140–35 млн лет (трековый возраст апатита) различные части АВБ пересекли изограду в  $110 \pm 10^\circ\text{C}$ , соответствующую закрытию трековой системы апатита. На основании результатов обратного моделирования длин треков деления апатита (врезка на рис. 2) в период 80–60 млн лет



**Рис. 1.** Схема расположения герцинских гранитоидов Забайкалья [7, 8]. Кружками показаны места отбора проб для термохронологических исследований. Приведены результаты U/Pb-датирования по циркону (Zr) [7, 8], <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-датирования по амфиболу (Am), биотиту (Bt), полевому шпату (Fs), плагиоклазу (Pl) [9], использованы опубликованные результаты трекового датирования (AFT) [10] и новые данные (выделены синим шрифтом).

назад гранитоиды, отобранные на современном эрозионном срезе в средней части АБВ, были выведены до температур в 80°С (глубина залегания 3–2 км), что соответствует мощности денудации около 1.5–1 км. Далее в период 60–3 млн лет на территории Забайкалья происходила медленная денудация менее чем 0.5 км мощности пород, что

свидетельствует в пользу тектонической стабилизации в регионе. Крутое поведение графика термической истории пород АБВ (врезка на рис. 2) фиксируется в период последних 3 млн лет. Резкое охлаждение пород может быть связано с дальним тектоническим воздействием Индо-Евразийской коллизии, которая привела к выво-



**Рис. 2.** Термохронологическая диаграмма эволюции гранитоидов Ангаро-Витимского батолита. Цветом выделены образцы юго-западной части батолита (зеленый), полуострова Святой нос и восточного берега озера Байкал (синий), северо-восточной части батолита (красный). Голубые линии соответствуют возрасту этапов формирования покровно-сдвиговых структур Восточного Саяна: I – покровный, II – покровно-складчатый, III – складчато-сдвиговый [13, 14]. Белым цветом выделены новые данные трекового возраста апатита. На врезке показаны результаты обратного моделирования длин треков деления апатита с использованием программного обеспечения AFTSolve1 [15]. APAZ – зона частичного отжига апатита.

ду на дневную поверхность пород АВБ в результате денудации около 3–2 км их мощности.

Таким образом, в период проявления Монголо-Охотской орогении (170–140 млн лет назад) произошло поднятие пород АВБ с глубин 10–7 км до глубин 4–3 км, что может быть связано с интенсивным горообразованием в Забайкалье и денудацией около 6–4 км мощности земной коры. Это вывод согласуется с данными о проявлении процессов коллизионных и постколлизионных преобразований утолщенной континентальной коры в Забайкалье с формированием многочисленных комплексов метаморфических ядер в поздней юре–раннем мелу [1, 6]. Полученные данные о тектоно-термальной эволюции пород АВБ позволяют проводить взаимосвязи с формированием Монголо-Охотского орогена и осадконакоплением в юрско-раннемеловых Иркутском, Канско-Ачинском, Тувинском, Кузнецком и Западно-Сибирском бассейнах.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 22-17-00038.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arzhannikova A.V., Demonterova E.I., Jolivet M., et al.* Late Mesozoic evolution of western Transbaikalia: Evidence for rapid geodynamic changes from the Mongol-Okhotsk collision to widespread rifting // *Geoscience Frontiers*. 2020. V. 11. P. 1695–1709.
2. *Hodges K.V.* Geochronology and Thermochronology in Orogenic Systems // In: *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier, 2004. P. 263–292.
3. *Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Ivanov A.V.* Late Paleozoic – Mesozoic subduction-related magmatism at the southern margin of the Siberian continent and the 150 million-year history of the Mongol-Okhotsk Ocean // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013. V. 62. P. 79–97.
4. *Диденко А.Н., Каплун В.Б., Малышев Ю.Ф., Шевченко Б.Ф.* Структура литосферы и мезозойская геодинамика востока Центрально-Азиатского складчатого пояса // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 5. С. 629–647.
5. *Shevchenko B.F., Popeko L.I., Didenko A.N.* Tectonics and evolution of the lithosphere of the eastern fragment of the Mongol-Okhotsk orogenic belt // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. V. 5 (3). P. 667–682.
6. *Wang T., Guo L., Zheng Y., et al.* 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.
7. Цыганков А.А., Матуков Д.И., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Посохов В.Ф., Цыренов Б.Ц., Хромов А.А., Сергеев С.А. Источники магм и этапы становления позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья // *Геология и геофизика*. 2007. Т. 48. № 1. С. 156–180.
  8. Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н., Буянтуев М.Д. Геодинамика позднепалеозойского батолитообразования в Западном Забайкалье // *Петрология*. 2017. Т. 25. № 4. С. 395–418.
  9. Травин А.В., Владимиров А.Г., Цыганков А.А., Ханчук А.И., Эрнст Р., Мурзинцев Н.Г., Михеев Е.И., Хубанов В.Б. Термохронология Ангаро-Витимского гранитоидного батолита, Забайкалье, Россия // *Доклады академии наук*. 2020. Т. 494. № 1. С. 53–59.
  10. Jolivet M., De Boisgrollier T., Petit C., et al. How old is the Baikal Rift Zone? Insights from apatite fission track thermochronology // *Tectonics*. 2009. V. 28. TC3008.
  11. Ярмолюк В.В., Будников С.В., Коваленко В.И., Антипин В.С., Горегляд А.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Козаков И.К., Ковач В.П., Яковлева С.З., Бережная Н.Г. Геохронология и геодинамические условия формирования Ангаро-Витимского батолита // *Петрология*. 1997. Т. 5. № 5. С. 451–466.
  12. Литвиновский Б.А., Посохов В.Ф., Занвилевич А.Н. Новые Rb-Sr данные о возрасте позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья // *Геология и геофизика*. 1999. Т. 40. № 5. С. 694–702.
  13. Буслов М.М., Рябинин А.Б., Жимулев Ф.И., Травин А.В. Проявление позднекарбонovo-раннепермских этапов формирования покровно-складчатых структур в южном обрамлении Сибирской платформы (Восточные Саяны, Южная Сибирь) // *Доклады академии наук*. 2009. Т. 428. № 4. С. 1–4.
  14. Буслов М.М., Джен Х., Травин А.В., Отгонбатор Д.Ч., Куликова А.В., Чен Минг, Глори С., Семаков Н.Н., Рубанова Е.С., Абилдаева М.А., Войтишек Е.Э. Трофимова Д.А. Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54 (10). С. 1600–1627.
  15. Ketcham R.A., Donelick R.A., Donelick M.B. (AFTSolve: A program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data // *Geol Mat Res*. 2000. 2:(electronic).

## THERMOCHRONOLOGY OF THE ANGARA-VITIM GRANITOID BATHOLITH AS A CHRONICLE OF THE EVOLUTION OF THE MONGOL-OKHOTSK OROGEN

A. V. Travin<sup>a,b,#</sup>, M. M. Buslov<sup>a</sup>, Yu. A. Bishaev<sup>a</sup>, and A. A. Tsygankov<sup>c,d</sup>

<sup>a</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>b</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>c</sup>N.L. Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>d</sup>Buryat State University, Ulan-Ude, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: travin@igm.nsc.ru

Presented by Academician of the RAS V.V. Yarmolyuk October 17, 2022

The thermal history of the Late Paleozoic granitoids of the Angara-Vitim batholith (ABB) was reconstructed using a multi-system approach including U/Pb, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, and fission track dating methods. The rocks of the Barguzinsky and Chivyrkuysky complexes were studied at sites in the southwestern and northeastern parts of the batholith, as well as on the Svyatoy Nose Peninsula and the eastern shore of Lake Baikal. The similar thermal history is reconstructed for the rocks of all sites as a whole. The steep position of the thermal history graph immediately after the formation of the ABB rocks indicates a major denudation epoch with an amplitude of about 7–5 km associated with the Late Paleozoic orogeny. After the epoch of tectonic stabilization, characterized by the time-stretched closure of the biotite isotope system, the closure of the feldspar/plagioclase isotope system occurs in the range of 170–140 Ma. This interval coincides with the closure of the Mongol-Okhotsk Ocean and the beginning of the formation of the orogen of the same name and is characterized by an amplitude of denudation of about 3 km. Further, in the period of 60–3 Ma, a slow denudation took place on the territory of Transbaikalia, which ended with a relatively sharp cooling of rocks during the last 3 Ma and denudation with an amplitude of about 3–2 km. This may be due to the long-range tectonic impact of the Indo-Eurasian collision. The obtained data on the tectonic-thermal evolution of AVB rocks can serve as a basis for identifying the relationship with the formation of the Mongol-Okhotsk orogen and sedimentation in the Jurassic-Early Cretaceous Irkutsk, Kansk-Achinsk, Tuva, Kuznetsk and West Siberian basins.

**Keywords:** U/Pb, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, fission track dating, thermochronological reconstructions, granitoid batholiths, Mongol-Okhotsk orogen, denudation