

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 thermo-

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

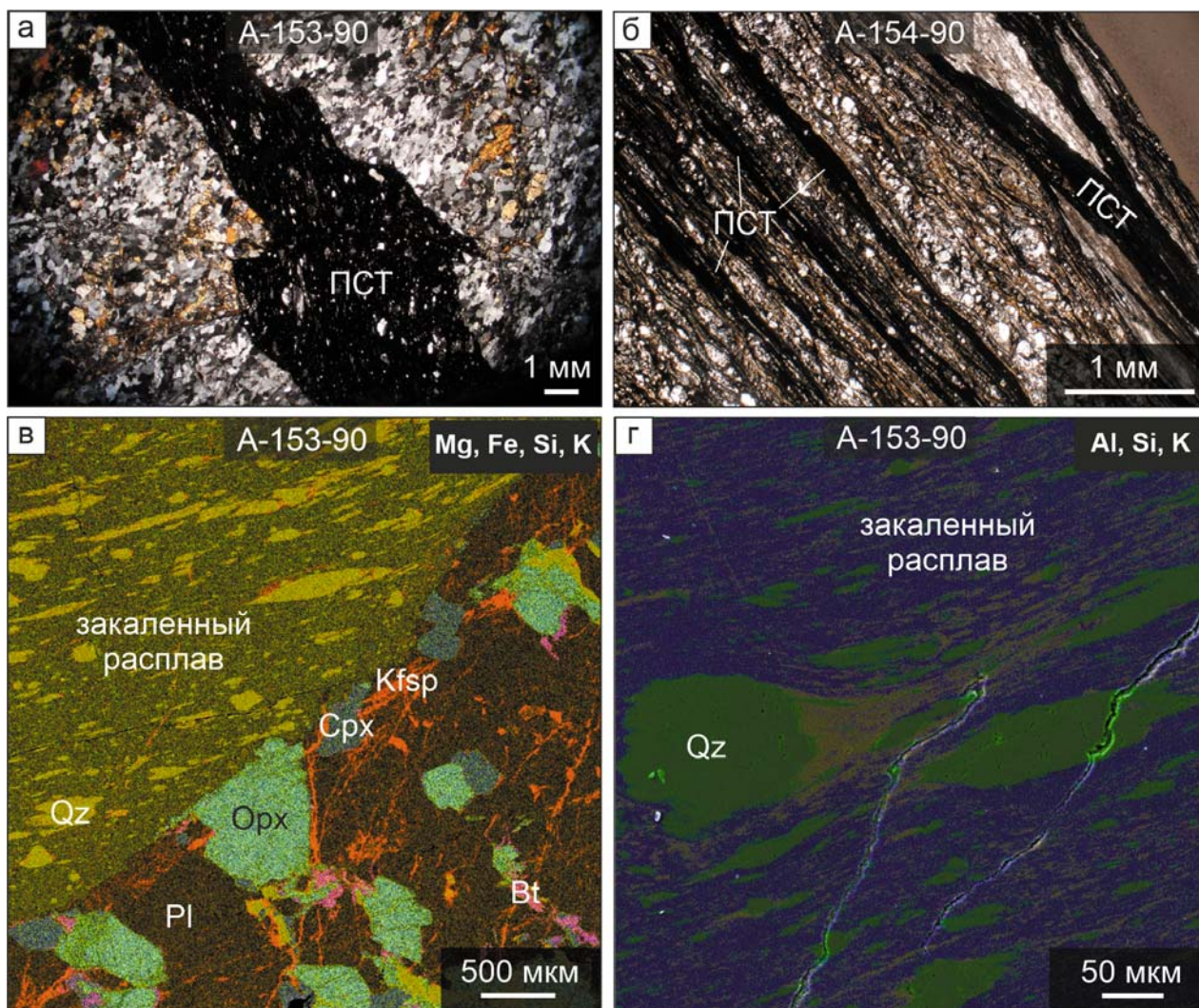
Funding. The study was carried out under state assignment to the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

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  $\text{Ar}$ - $\text{Ar}$ -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»  $\text{K}/\text{Ar}$ -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  $\text{K}/\text{Ar}$ -



**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 290–370 °С, 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 33–41 км

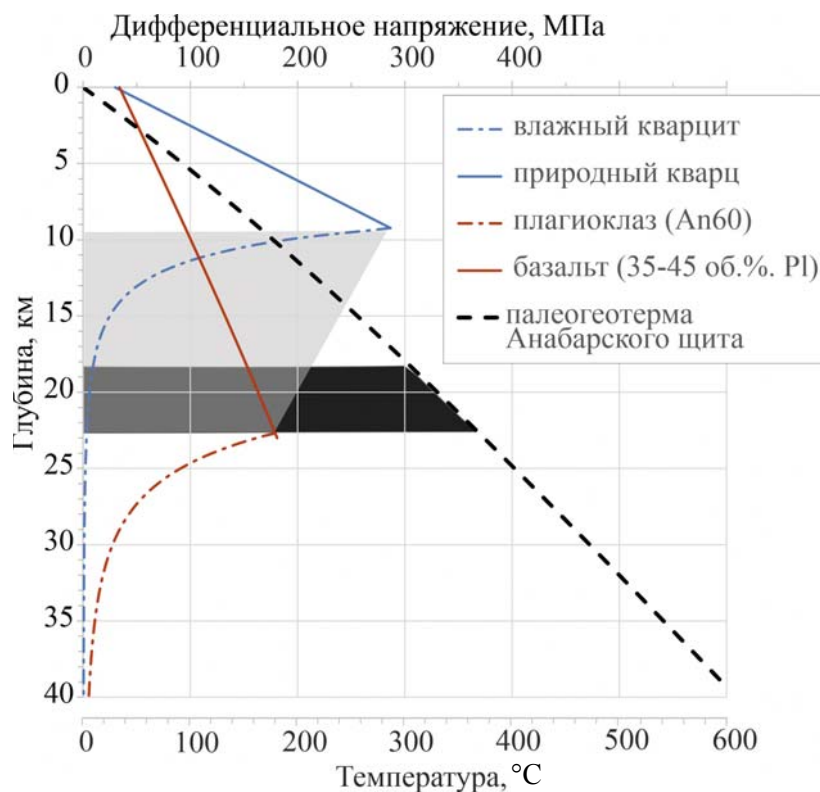


Рис. 2. Профили предельных дифференциальных напряжений в кварце и плагноклазе (верхняя горизонтальная ось), характеризующие параметры перехода хрупких в ползучие деформации. Зависимости построены для Qtz- и Pl-содержащих материалов с использованием реологических данных из [Полянский и др., 2022]. Скорость 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 высокометаморфизованных 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., Ship-ton 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., Ship-ton 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., Egor-kin 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 Fen-noscandia and their <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating. *Doklady Earth Sciences.* 2020;493(1):485–489. doi: 10.1134/S1028334X20070119

Nozhkin A. D., Likhonov I. I., Krylov A. A., Savko K. A., Serov P. A. Sapphirine-bearing granulites of the Ana-bar Shield. *Geochem. Int.* 2019;57(5):524–539. doi: 10.1134/S0016702919050070

Polyansky O. P., Nozkin 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