

УДК 550.93;551.24;541.253

## ПЕРВЫЕ НАХОДКИ И $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -ДАТИРОВАНИЕ ПСЕВДОТАХИЛИТОВ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОМ ЗОНАЛЬНО МЕТАМОРФИЗОВАННОМ ЛАДОЖСКОМ КОМПЛЕКСЕ ФЕННОСКАНДИИ

© 2020 г. Член-корреспондент РАН Ю. А. Морозов<sup>1,\*</sup>, Д. С. Юдин<sup>2,\*\*</sup>, А. В. Травин<sup>2</sup>,  
А. И. Смутьская<sup>1</sup>, А. Л. Кулаковский<sup>1</sup>, М. А. Матвеев<sup>1</sup>

Поступило 21.04.2020 г.

После доработки 30.04.2020 г.

Принято к публикации 06.05.2020 г.

Представлены результаты  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования псевдотахилитов, впервые выявленных в зонально метаморфизованном от зеленосланцевой до гранулитовой фации палеопротерозойском ладожском комплексе свекофеннид. Установлен широкий возрастной интервал формирования псевдотахилитов в рифее (1.59–1.31 млрд лет), предположительно связанный с эксгумацией глубинных пород, испытавших свекофеннский тектогенез, и последующим проявлением в регионе (юго-восточной Фенноскандии) процессов орогенеза и рифтогенеза.

*Ключевые слова:* псевдотахилиты,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование, свекофенниды, зональный метаморфизм, эксгумация, орогенез, рифтогенез

**DOI:** 10.31857/S2686739720070117

Псевдотахилиты (ПСТ) – темный афанитовый материал инъекционно-жильных форм обособления, обычно пространственно связанных с разрывными нарушениями, встречаются в породах разного состава, генезиса и глубинности. Они имеют полигенную природу и несколько морфогенетических типов, среди которых преобладают продукты тонкого механического дробления породы, ее частичного фрикционного плавления и последующей девитрификации стекла [1].

Вопросы изучения псевдотахилитов в докембрийских метаморфических толщах и тем более их возрастного датирования обладают особой актуальностью и значимостью по целому ряду причин. Во-первых, они единичны ввиду редкой сохранности, особенно в полиметаморфических комплексах, из-за обычно проявленных процессов наложенной перекристаллизации, существенно изменяющей первозданный вид и состав матрицы ПСТ, что дает основание их образно сравнивать с “исчезающими чернилами” [2]. Во-

вторых, из-за специфичности и сложности датирования, связанной, либо с нарушенностью изотопных систем последующими термально-деформационными событиями, либо с ограниченностью применения тех или иных изотопных методов ввиду специфики составов и наличия/отсутствия в ПСТ определенных минералов-носителей радиоактивных изотопов. В-третьих, они позволяют оценивать особенности фрикционного плавления геоматериала в условиях высокоскоростных (часто сейсмогенных) локализованных деформаций и составы возникающих расплавов. Наконец, ПСТ и вмещающие их породы (протолит ПСТ) дают дополнительные сведения о геодинамической и тектоно-термальной эволюции того региона, где они проявлены, об условиях и механизмах эксгумации в ходе тектогенеза корового материала, и о соответствующих особенностях реологического поведения пород на разных глубинах.

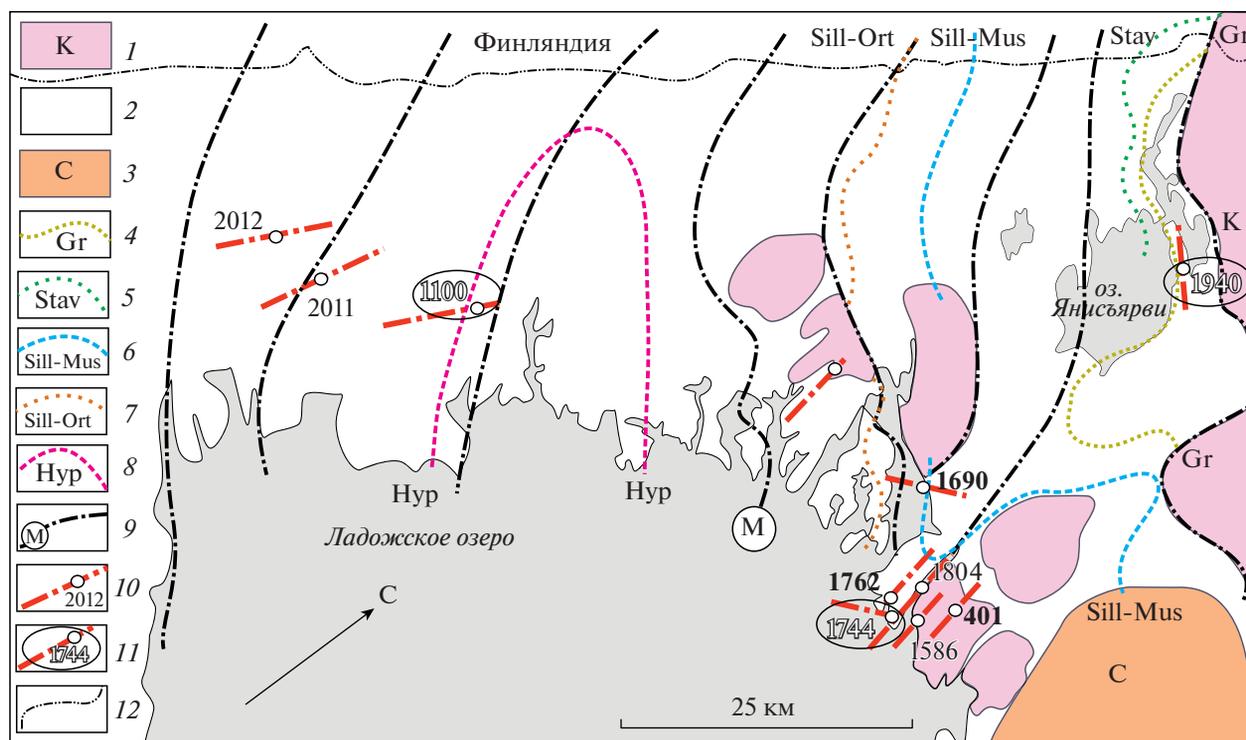
Представляемые здесь впервые данные по ПСТ из Северного Приладожья как раз позволяют в некоторой степени осветить каждый из вышеупомянутых аспектов, а также расширить фактологическую базу деформационно-метаморфических событий в регионе. Существенно то, что ПСТ найдены (более десятка проявлений) во всех зонах зонально метаморфизованного от низов зеленосланцевой до гранулитовой фации палеопротерозойского ладожского комплекса (рис. 1) [3, 4], что позволило оценить особенности разломных

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболев  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

\*E-mail: morozov@ifz.ru

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

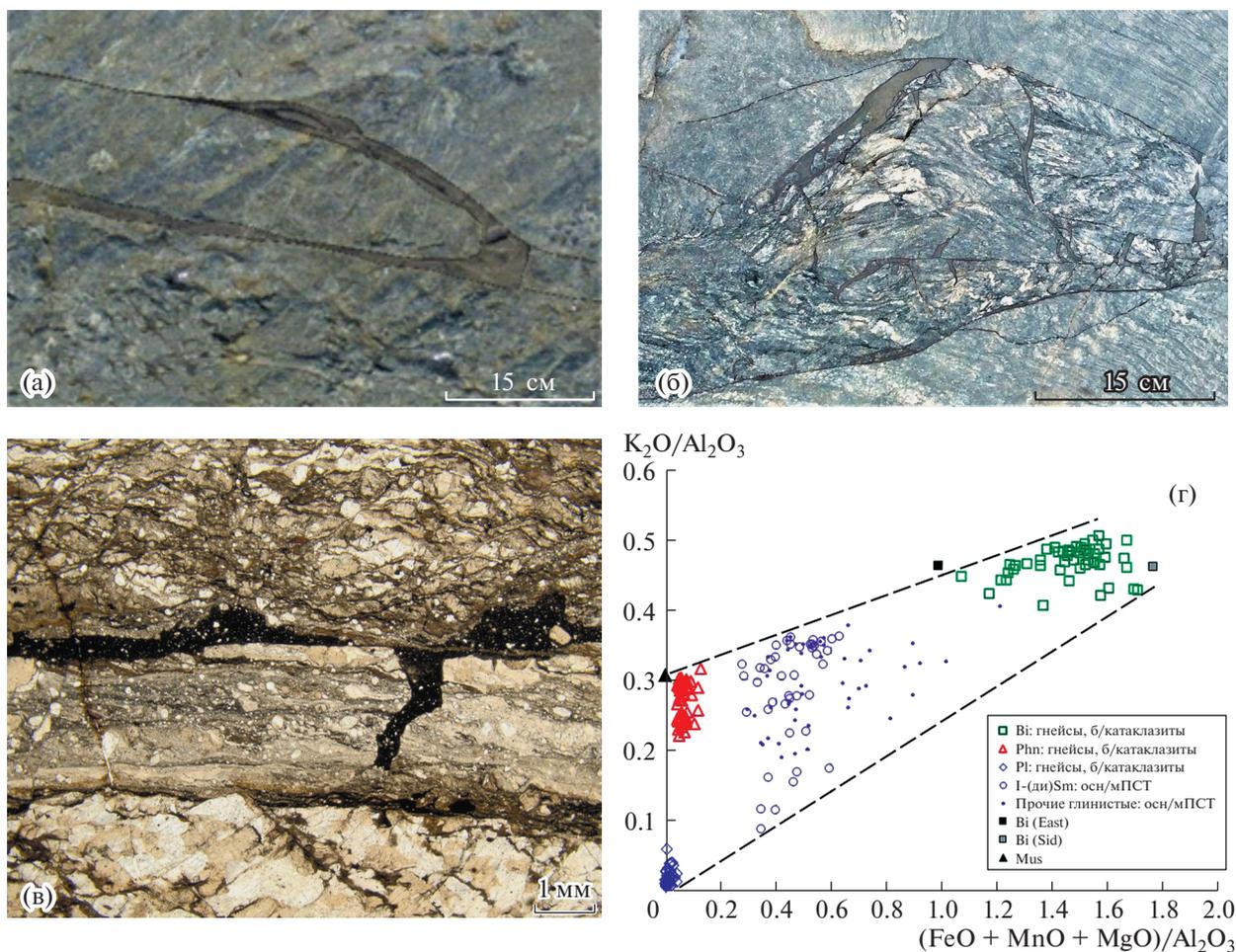


**Рис. 1.** Схема метаморфической зональности и структуры палеопротерозойского ладожского комплекса с положением разрывов, отмеченных ПСТ, и точек их опробования. 1 – гранито-гнейсы архея в Карельском массиве (К) и в куполовидных выступах фундамента; 2 – ладожский комплекс; 3 – Салминский массив гранитов-рапакиви; 4–8 – изограды метаморфизма: граната, ставролита, силлиманита-мусковита, силлиманита-ортоклаза; гиперстена соответственно; 9 – крупнейшие разломы и Мейерский надвиг (М); 10 – разломы с выявленными ПСТ; 11 – точки датирования ПСТ; 12 – государственная граница.

преобразований в породах разных уровней глубинности. Некоторые из них сложены внедренным микрокатакластическим материалом, но значительная часть содержит девитрифицированное стекло, предположительно связанное с проявлением процессов частичного фрикционного плавления при сейсмических скоростях подвижки по разломам [1]. Не менее важно было оценить временной интервал и возрастные рубежи формирования ПСТ, чтобы установить их связь, либо с процессами свекофеннского тектогенеза, либо с последующими тектоно-термальными событиями в юго-восточной Фенноскандии.

Подробная петролого-геохимическая характеристика преобразований пород при формировании ПСТ в разных зонах метаморфизма, с оценкой термодинамических параметров и составов фрикционных расплавов, дана в [5]. Здесь же отметим, что все найденные ПСТ развиваются по исходно однотипным породам близкого валового состава – метапсаммитам, представленным в зеленосланцевой зоне  $Vi-Mus-Ab-Q$ -сланцами (ЛВ1940), в амфиболитовой фации (ЛВ1744)  $Vi-Mus-Pl-Kfs-Q$ -гнейсами, а в гранулитовой (ЛВ1100) – кристаллическими сланцами  $Vi-Pl-$

$Kfs-Q$ -состава с реликтами гиперстена, претерпевшими наложенную гранитизацию. Обособление в них стекловатого афанитового материала ПСТ происходило как в инъекционных формах, отчетливо секущих структуры и текстуры пород (рис. 2а, 2б), так и вдоль генерирующих ПСТ разрывных поверхностей с небольшими опережающими ответвлениями (рис. 2в). Во всех случаях эти обособления оказываются ассоциированными и сопряженными с тектонитами (бластокатаклазитами, бластомилонитами) по вмещающим породам, которые фиксируют предшествующие стадии разломных преобразований пород. Минерально-фазовый анализ триады разностей – исходной вмещающей породы (сланец, гнейс), бластокатаклазита по ней и расплавленного материала ПСТ, позволяет проследить эволюционный путь этих метаморфизованных на разных глубинах, а затем последовательно выведенных к поверхности, деформационных фаций. Все породы, претерпевшие разную фоновую региональную метаморфизма, подверглись сначала однотипному бластокатаклазу уровня эпидот-амфиболитовой фации, а затем локализованным хрупким деформациям с проявлением частичного плавления и формированием ПСТ. Как пока-



**Рис. 2.** Фото прожилков ПСТ в сланцах LB1690 (а), в гнейсах LB1744 (б), в кристаллических сланцах LB1100 (в); диаграмма  $(\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  для минералов протолита (биотиты, фенгиты, плагиоклазы) и для составов матрицы ПСТ (г). Пунктир – конноды, соединяющие минералы протолита и фиксирующие поле изохимических преобразований.

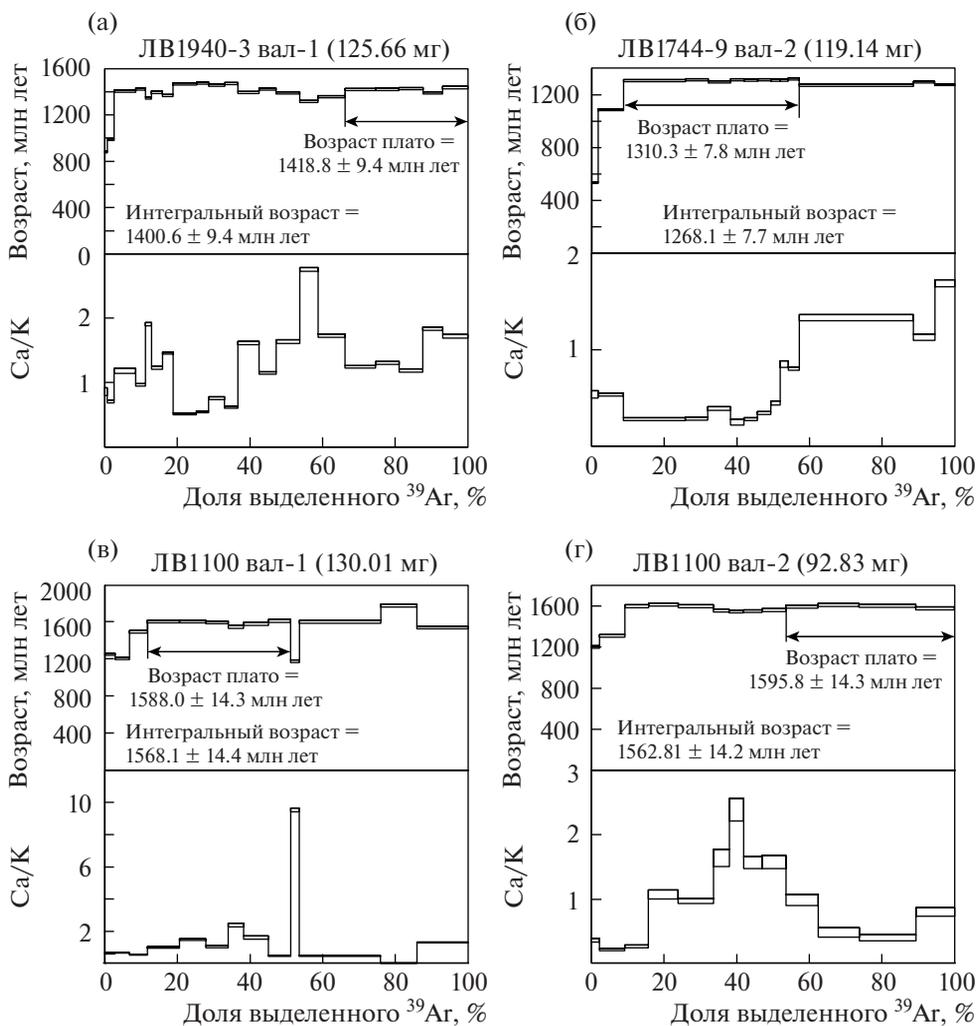
зало изучение стекла ПСТ, его состав оказался близким к слюдистому расплаву, с раскристаллизацией глинистых минералов иллит-сметитового состава (рис. 2г). Такой несколько однотипный и весьма показательный состав стекла в породах разной глубины первоначальных метаморфических преобразований позволяет сделать вывод о формировании ПСТ уже после того, как породы претерпели региональную эксгумацию и были выведены на единый приповерхностный уровень. Присутствие в стекле глинистых фаз дает возможность локализовать глубинность его раскристаллизации (порядка 3 км) исходя из того факта, что температурный диапазон устойчивости диоктаэдрических смектитов находится в интервале  $50-120^\circ\text{C}$ , а смешаннослойных, обогащенных смектитом фаз – в диапазоне  $40-150^\circ\text{C}$  [6, 7]. Это вполне соответствует, на наш взгляд, необходимым и достаточным условиям формирования ПСТ (хрупкий характер деформаций, высокий

коэффициент трения, “сухие” условия реализации подвижки, быстрый отвод тепла при поступлении в разломную зону приповерхностных вод) близко к верхней переходной зоне от асейсмического к сейсмогенному типу поведения геоматериала [8].

Выявленная обогащенность стекла калиевыми слюдами, а также изохимичность произошедших преобразований (рис. 2г) обусловили возможность их датирования аргон-аргоновым методом.

Геохронологические  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -исследования методом ступенчатого прогрева проводились по методике, описанной в [9]. Изотопный состав аргона измерялся на многоколлекторном масс-спектрометре Argus фирмы “GV-Instruments” (Англия). Ошибки измерений, приведенные в тексте и на рисунках, соответствуют диапазону  $\pm 1\sigma$ .

Полученные возрастные  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -спектры ПСТ (рис. 3), при весьма вариативных Са/К-от-



**Рис. 3.** Возрастные  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -спектры витрифицированной матрицы ПСТ из разных зон метаморфизма Приладожья. (а) образец ЛВ1940 – из зоны зеленосланцевой фации; (б) образец ЛВ1744 – из зоны амфиболитовой фации; (в, г) образец ЛВ 1100 – из зоны гранулитовой фации.

ношениях, связанных предположительно с присутствием в стекле обломков плагиоклаза и калиевого полевого шпата (обломочного биотита и мусковита не обнаружено), показали вполне выдержанные плато, которые характеризуют высокую долю выделенного аргона (более 60%). При этом полученные датировки ПСТ из трех разных зон метаморфизма фиксируют три различных возрастных рубежа преимущественно раннего рифея:  $1595\text{--}1588 \pm 14.3$  млн лет в гранулитовой зоне,  $1310 \pm 7.8$  млн лет в зоне амфиболитовой фации и  $1418 \pm 9.4$  млн лет в зоне зеленосланцевой метаморфизма. Такой разброс возрастов авторы не связывают ни с вариациями унаследованного  $^{40}\text{Ar}$  аргона из минералов, ни с потерями обоих изотопов аргона в процессе датирования, полагая, что стекловатая матрица ПСТ является средой, “консервирующей” изотопную систему содержащихся в ней глинистых минералов. Можно допустить,

что они отражают многократность реализации подвижек по разломам и их разновременность в разных доменах юго-восточной Фенноскандии, обусловленную особенностями региональных посторогенических событий.

Ввиду полного отсутствия работ по ПСТ в Приладожье, единственным ориентиром в приемлемости полученных здесь возрастных меток может быть публикация по  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датированию инъекций ПСТ в смежных районах Южной Финляндии –  $1583 \pm 5$  млн лет [10]. Полученный нами возраст ПСТ в образце ЛВ1100 согласуется с этой датировкой и вписывается в интервал 1.64–1.53 млрд лет, заданный предельными рубежами внедрения крупнейших в регионе массивов рапакиви – Выборгского ( $1640 \pm 5$ ;  $1630 \pm 5$  млн лет) и Салминского ( $1547 \pm 1\text{--}1529 \pm 1$  млн лет) соответственно [11, 12]. Их внедрение традиционно связывается с орогеническими зонами, характеризу-

ющими начало нового, внутриплитного этапа развития и проявлением постколлизийного растяжения [13]. Два других временных рубежа формирования ПСТ могут отражать усиление этой же тенденции, приведшей в дальнейшем к формированию в регионе структуры Ладожско-Пашской грабен-синклинали [14], с последовательным ее заполнением отложениями телемаркского комплекса (1.52–1.48 млрд лет), приозерской и салминской свит, внедрением Валаамского силла (1.46–1.45 млрд лет), а также более молодыми осадками плитной стадии тектонической эволюции региона.

Таким образом, формирование ПСТ в Северном Приладожье, происходившее преимущественно в раннем рифее, можно предположительно связывать с обстановкой растяжения посторогенического этапа эволюции, с которой довольно часто бывают сопряжены проявления сейсмических событий на активных континентальных окраинах.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны профессору РАН Р.В. Веселовскому (МГУ, ИФЗ РАН) за содействие в работе и обсуждение результатов.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИФЗ РАН, ИГМ СО РАН и частично по гранту

РФФИ № 19–05–00256 (синметаморфическое структурообразование в системе чехол-фундамент).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов Ю.А. и др. // ДАН. 2019. Т. 484. № 5. С. 589–594.
2. Kirkpatrick J. D., Rowe C.D. // J. Struct. Geol. 2013. V. 52. P. 183–198.
3. Ладожская палеопротерозойская структура. Петрозаводск. Изд-во ГИ КарНЦ РАН. 2020. 435 с.
4. Великославинский Д. А. Сравнительная характеристика регионального метаморфизма умеренных и низких давлений. Л.: Наука, 1972. 190 с.
5. Морозов Ю.А. и др. // Петрология. 2020. (Подготовлена к печати.)
6. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы. М.: Наука, 1991. 176 с.
7. Haines S.H., van der Pluijm B.A. // Journ. Struct. Geol. 2012. V. 43. P. 2–32.
8. Морозов Ю.А. и др. // Физика Земли. 2018. №1. С. 3–25.
9. Травин А.В., Юдин Д.С. и др. // Геохимия. 2009. № 11. С. 1181–1199.
10. Torvela T., Manttari I., Hermansson T. // Prec. Res. 2008. V. 160. С. 277–298.
11. Amelin Yu.V., et al. // Contrib Mineral Petrol. 1997. V. 127. P. 353–368.
12. Vaasjoki M., et al. // Prec. Res. 1991. V. 51. P. 227–243.
13. Ларин А.М. // Стратигр. геол. коррел. 2009. Т. 17. № 3. С. 3–28.
14. Амантов А.В. // Рег. геол. и металлог. 2014. № 58. С. 22–32.

## FIRST DISCOVERY AND $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ DATING OF PSEUDOTACHYLYTES IN THE ZONAL METAMORPHOSED PALEOPROTEROZOIC LADOGA COMPLEX OF FENNOSCANDIA

Corresponding Member of the RAS Yu. A. Morozov<sup>a, #</sup>, D. S. Yudin<sup>b</sup>, A. V. Travin<sup>b</sup>, M. A. Matveev<sup>a</sup>, A. L. Kulakovskiy<sup>a</sup>, and A. I. Smulskaya<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: morozov@ifz.ru

The results of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of pseudotachylytes, first identified in different zones of the zonal metamorphosed Paleoproterozoic Ladoga complex, are presented. A wide age range has been established for the formation of pseudotachylytes in Riphean (1.59–1.31 billion years), presumably caused by exhumation of deep rocks during Svecofennian tectogenesis, and the subsequent manifestation of orogenesis and riftogenesis in the SE Fennoscandia.

**Keywords:** pseudotachylytes,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating, svecofennides, zonal metamorphism, exhumation, orogenesis, riftogenesis