

УДК 551.253; 551.254

ПСЕВДОТАХИЛИТЫ – ДВА ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПА

Член-корреспондент РАН Ю. А. Морозов,
М. А. Матвеев, А. И. Смутьская, А. Л. Кулаковский*

Поступило 14.05.2018 г.

На основе изучения двух разновидностей псевдотахилитов (ПСТ) по гранитоидам из рифейского комплекса Баренцевоморского побережья Кольского п-ва и метапсаммитам палеопротерозойского комплекса Северного Приладожья несколькими независимыми методами аналитики показано, что ПСТ принадлежат к двум разным генетическим формам: механически измельчённым породам и продуктам расплавления соответственно. Для расплавных разновидностей дана подробная характеристика минерально-вещественных преобразований исходной породы в стекловатую матрицу ПСТ; получены свидетельства первоначального выплавления слюистой эвтектики с последующим её смещением к гранитной. Сделан вывод о наиболее вероятном формировании расплавного ПСТ за счёт фрикционного расплавления породы при быстром подъёме её блоков с глубин 12–15 км до поверхностных уровней коры (<3 км) по разломам предполагаемой сейсмогенной природы. Высказано мнение о том, что измельчение и фрикционное плавление могут быть взаимодополняющими, а не взаимоисключающими процессами и образованию расплавного ПСТ обычно предшествует стадия механического измельчения породы.

Ключевые слова: мезозой, псевдотахилит, динамическая подвижка, механическое дробление, фрикционное расплавление, эвтектика.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524845589-594>

Природа псевдотахилитов (ПСТ) — тёмного афанитового материала жильных форм обособления — предмет длительных и не прекращающихся дискуссий [8–10, 12, 14, 15]. Их связь с импактными структурами позволяет в качестве первопричины формирования рассматривать шоковое ударное воздействие и распространение в массиве пород упругого волнового фронта [9], приводящего к дезинтеграции и остеклению породного матрикса. Приуроченность к активным сейсмогенным разломным зонам приводит ряд исследователей к варианту фрикционного расплавления при высокоскоростном сдвиге с образованием стекловатой массы, включающей обломки минералов и пород окружающего субстрата [10]. Не менее часто главная роль в генезисе ПСТ отводится хрупкому, чисто механическому разрушению породы в зонах разрывов с образованием измельченной вплоть до наноразмерности обломочной матрицы типа микрокатаклазита [15]. Вместе с тем достаточно широко распространена точка зрения, допускающая в том или ином виде совмещение или комбинацию описанных процессов,

предполагая для ПСТ полифакторную природу или разный генезис в зависимости от реальной геологической обстановки [8]. Более того, есть мнение, что морфогенетические разности, связанные с дроблением, расплавлением и шоковым упругим воздействием — продукты разных стадий единого процесса преобразования пород в зависимости от скорости воздействия и, таким образом, генетически связаны [14].

В рамках проблемы изучения особенностей режима динамической подвижки по продуктам преобразований пород в разломах предполагаемой сейсмогенной природы [3] нами были исследованы ПСТ в двух районах Фенноскандии: на баренцевоморском побережье Кольского п-ва (п-ва Рыбачий-Средний) и в Северном Приладожье.

Псевдотахилиты в рифейском комплексе полуостровов Рыбачий–Средний впервые были обнаружены и описаны в зоне разлома Троллфиорд–Рыбачий–Канин [1], разделяющего эти полуострова и трассирующего зону взаимодействия Восточно-Европейского кратона и Западно-Арктической платформы. Они маркируют контакты тектонической пластины архейских пород, внедрённой в разрез рифейских турбидитов (мыс Вестник) и представляют собой ветвистую

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: akulakovskij@mail.ru

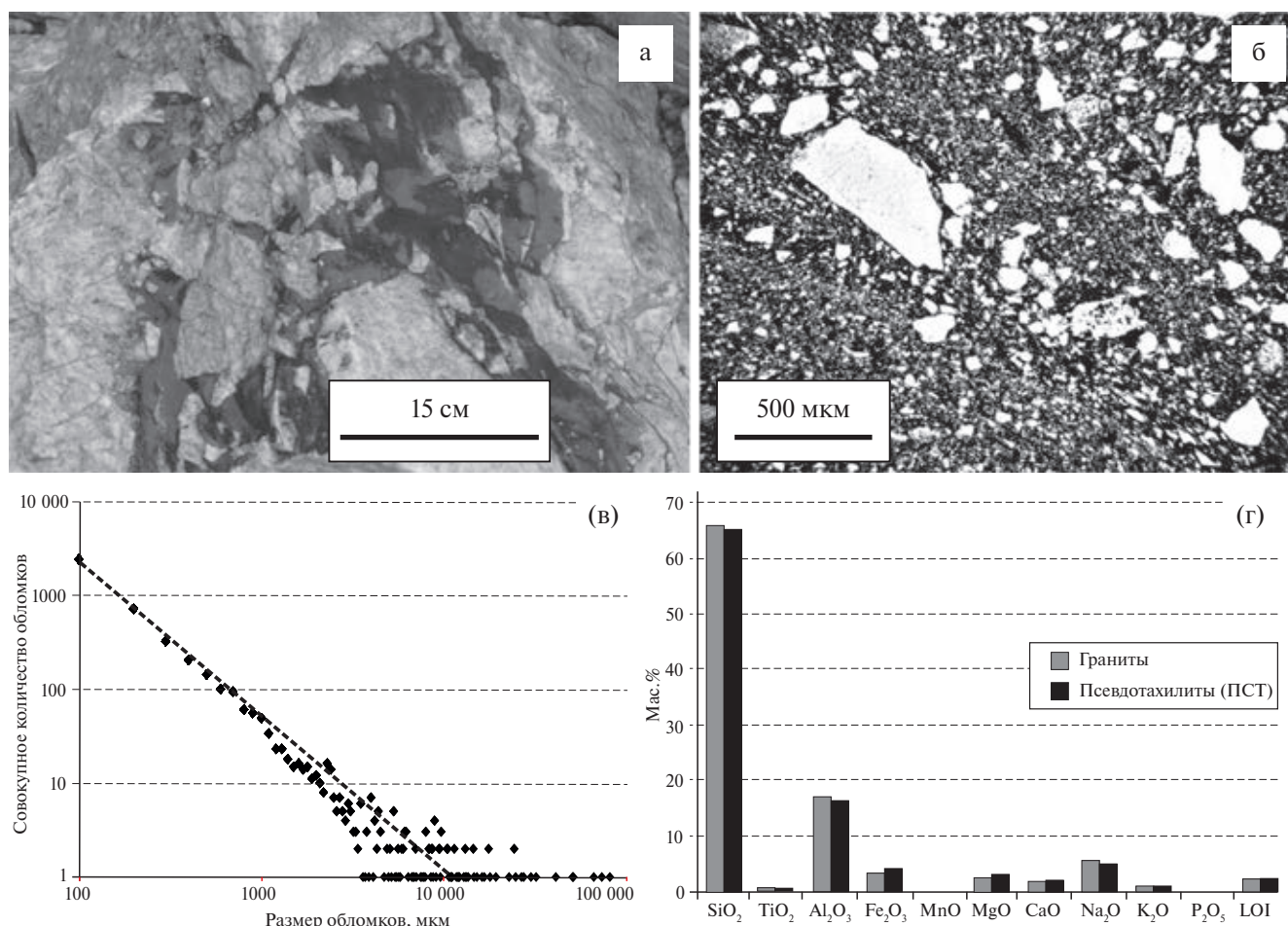


Рис. 1. Псевдотахилиты ПСТ мыса Вестник по гранитоидам (а), их микрообломочная структура в шлифе (б), график нормального логарифмического характера распределения обломков (в), диаграмма сопоставления химических составов ПСТ и окружающих гранитоидов (г).

систему прожилков чёрного афанитового материала в катаклазированных гранито-гнейсах и гранитоидах (рис. 1а). Их микроскопическое и микронзондовое обследование (рис. 1б) не показало видимых признаков плавления афанитового вещества, имевшего на всех масштабных уровнях рассмотрения мелкообломочную структуру, что свидетельствует в пользу варианта чисто механического дробления породы по типу катаклаза. Для формального подтверждения этого была использована методика фиксации различий между механически раздробленным субстратом и матрицей, испытывавшей процессы частичного расплавления, через оценку характера распределения размерности обломков в афанитовой матрице [11]. Исходя из фрактального характера фрагментирования породы, ожидается, что в случае её чисто механического дробления такое распределение имеет нормальный логарифмический характер, отмеченный обобщающей прямой с наклоном, соответствующим коэффициенту фрактальности.

Анализ распределения обломков по размерности в ПСТ мыса Вестник с использованием программы “ImageJ” показал нормальное логарифмическое распределение на всех тестируемых участках (рис. 1в), указывая на высокую вероятность именно механического дробления породы в разломе. Это не исключает варианта локального проявления процессов подплавления минерального вещества, но свидетельствует о явном доминировании процессов катаклаза при внедрении тектонической пластины гранитоидов.

Ещё одним косвенным свидетельством в пользу варианта механического измельчения породы, которое происходило в явно приповерхностных уровнях коры без значительных минерально-вещественных преобразований, стал факт практически полной идентичности химических составов матрицы ПСТ и вмещающего его гранита по основным минералообразующим элементам (рис. 1г).

Заметно иная ситуация выявляется в ПСТ по метатерригенным породам палеопротерозойской

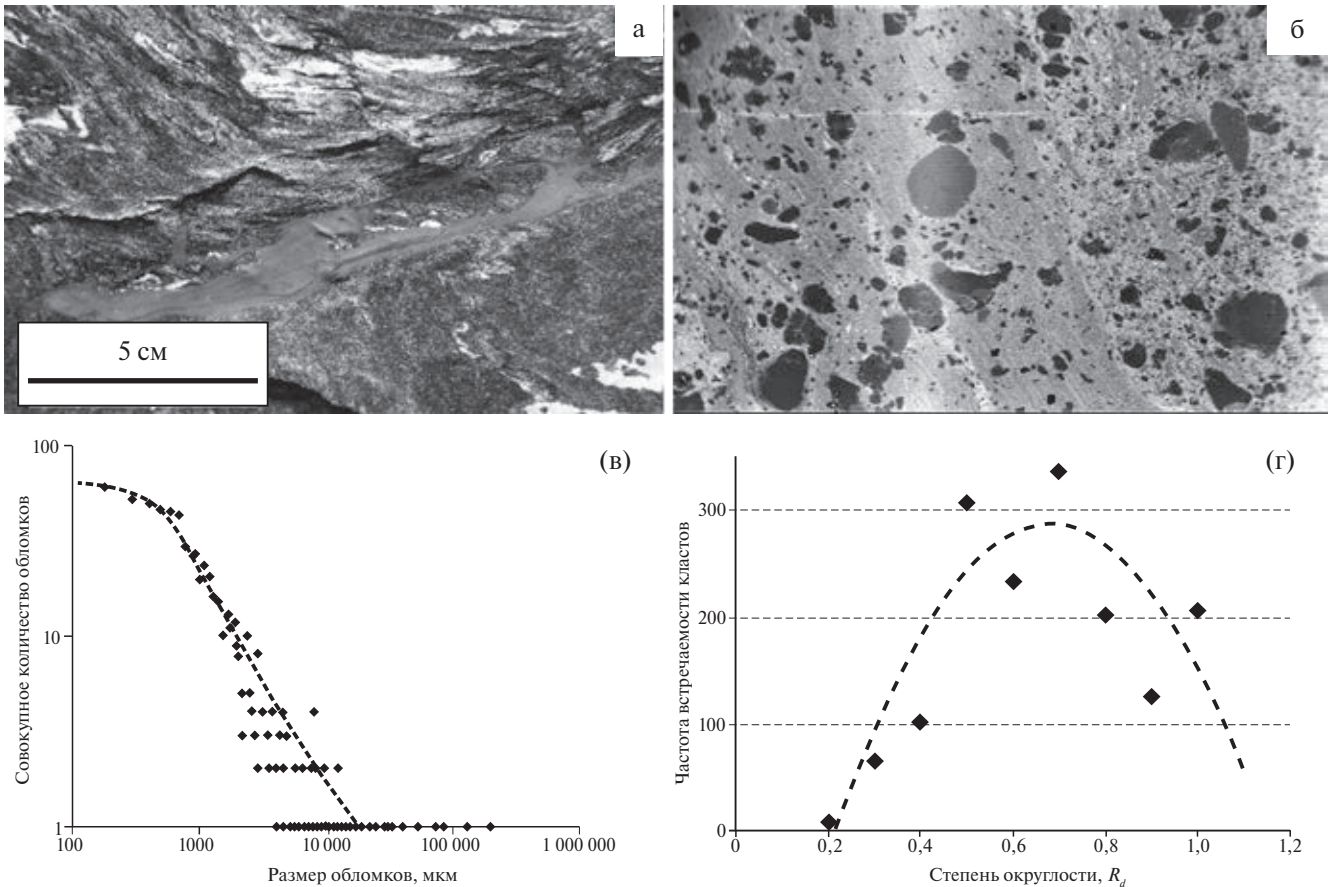


Рис. 2. ПСТ Северного Приладожья: жильные формы в обнажении среди слюистых сланцев (а), округленные обломки в стекловатой матрице (б), график распределения обломков по размерности (в), график параметра округлости оплавленных фрагментов (г).

ладожской серии (Северное Приладожье). Там прожилки ПСТ обычно приурочены к наиболее поздним разрывным нарушениям, секущим все предшествующие деформационно-метаморфические текстуры уровня силлиманит-мусковитовой фации (рис. 2а) и, вероятно, маркируют этап наложенных хрупких деформаций, связанных с орогенным этапом развития региона. Здесь выявляется заметно иной облик ПСТ с признаками течения и полосчатого строения, схожими с флюиальностью (рис. 2б), а сама бурая матрица визуальнo напоминает вулканическое стекло, изменённое наложенными процессами. Но наиболее существенна заметная округлость обломков, очевидная сглаженность углов и редкость остроугольных фрагментов. Важно и то, что эти округлые формы не всегда бывают мономинеральными, а довольно часто представляют собой породный агрегат минералов, частично резорбированный бурым стеклоподобным материалом, т.е. реформированию с очевидным участием процессов плавления, подвергались фрагменты породы. В пользу участия процессов

плавления свидетельствуют также результаты морфометрического анализа обломочных фрагментов матрикса. Статистический характер их распределения по размерам показал явное отклонение (искривление кривой) от нормальной логарифмической последовательности (рис. 2в), указывающее на уменьшение количества малоразмерных обломков с рубежа 700–800 мкм и позволяющее связывать это с их растворением в расплаве [7, 11]. Вывод о присутствии расплава в афанитовом матриксе можно сделать и на основании оценки степени округлости обломочных фрагментов в соответствии с формулой $R_d = \sum(r_i / R) / n$, где r_i — радиус кривизны в одном из углов обломка (мкм), R — радиус максимальной вписанной внутри класта окружности (мкм), n — число измеренных углов класта в данном сечении. С помощью такого подхода было эмпирически установлено [4], что параметр округлости $< 0,4$ характерен для обломков катакlastической природы, а $> 0,4$ — для псевдотачилитов, возникших с участием плавления. Для нашего случая этот параметр $> 0,6$ (рис. 2г).

Помимо установления самого факта проявления процессов плавления при формировании ПСТ Приладожья, самостоятельную значимость представляют явления структурно-вещественной эволюции пород в зоне разлома, вероятно происходившие (с учётом варианта сейсмогенной природы ПСТ) при повышенных скоростях подвижки. Здесь в единой последовательности можно видеть переработку исходных биотит-мусковит-двуполевошпатовых гнейсов ($T = 580\text{--}620^\circ\text{C}$, $P = 4\text{--}5$ кбар) через их бластокатаклиз и связанный с ним диафорез в бортовых частях разлома в частично расплавленную матрицу ПСТ с дальнейшей её раскристаллизацией. Произшедшие в связи подвижкой и перемещением этих гнейсов по разлому с глубин порядка 12–15 км к поверхности минеральные преобразования выразились в изменениях фазового, валового химического составов породы и составов основных породообразующих минералов: слюд, плагиоклазов.

Фазовые изменения при частичном плавлении оценены путём сопоставления составов исходной породы и обломков в стекле ПСТ. При плавлении падает процентное содержание всех минералов бластокатаклазита за исключением рудного. При этом степень переработки нарастает в ряду: кварц, плагиоклаз, единичные обломки биотита; полностью отсутствует мусковит, т.е. частичное плавление сопровождалось, прежде всего, исчезновением слюд.

Для оценки общей картины вещественных изменений при частичном плавлении было проведено сопоставление химического состава ПСТ с валовым составом вмещающих пород

методом рентгено-флюоресцентного анализа (ГЕОХИ РАН, аналитик Т.Г. Кузьмина), рис. 3а. Было установлено заметное обогащение стекла ПСТ Si, Na, при этом содержания Al, K падают, $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ растёт.

Кроме того, проведено аналитическое изучение слюд и плагиоклазов в ряду гнейс–бластокатаклизит–ПСТ (микронд SX100 в ГЕОХИ РАН, аналитик Н.Н. Конанкова).

Биотиты обильны во вмещающих, в ПСТ единичный биотит встречен в оплавленных обломках и в явно более поздних трещинах (“просечках”), секущих стекло (рис. 3б). К собственно биотитам отнесены составы с суммой октаэдрических катионов, близкой к трём в пределах 5% допущения. Это высокоглинозёмистые биотиты истонит–сидерофиллитового ряда ($0,40 < X_{\text{Altot}} \leq 0,44$). Нестехиометричные составы биотитов, сохраняющих ослабленные, но характерные окраску и плеохроизм, образуют тренд, приближаясь к значениям, характерным для белых слюд: $\sum_{\text{VI}} < 3$ ф.е., $0,41 < X_{\text{Altot}} < 0,65$ (рис. 3б). Изменения состава биотитов объясняют тонким послойным замещением их белыми слюдами. Иллитизация биотита — одна из реакций его гидратации [3].

Диоктаэдрические слюды вмещающих пород образуют последовательность мусковит–иллит–смешаннослойный типа иллит–сметит, при этом снижаются средние размеры чешуек, суммарное содержание щелочей ($\text{K}+\text{Na}+\text{Ca}$), ф.е. падает от 0,99 до 0,70 и, соответственно, возрастает степень гидратации [2].

Дисперсные иллиты и смешаннослойные ($0,77 \geq (\text{K}+\text{Na}+\text{Ca}) \geq 0,49$) обнаружены в

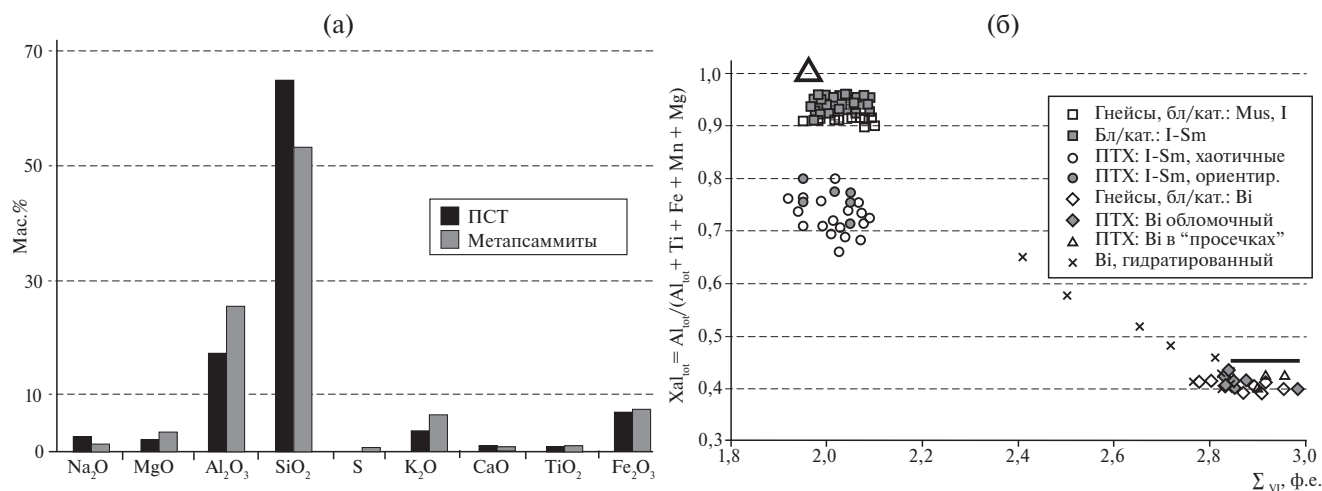


Рис. 3. Сопоставление вмещающих пород и ПСТ: по валовым химическим составам (а); по составам слюди-стых минералов (б). Большой треугольник — теоретический состав мусковита, чёрная линия — максимальная глинозёмистость “идеального” биотита (Bi — биотит, Mus — мусковит, I — иллит, Sm — смектит); бл/кат, Бл/кат. — бластокатаклазиты.

бластокатаклазитах и в стекле ПСТ. В ПСТ-матрице они идентифицированы в двух, вероятно, разновозрастных модификациях: в виде упорядоченно-ориентированных “потоков”, чаще всего в осевых зонах прожилков, и в виде хаотичных игольчатых прорастаний в краевых полосах стекловатой массы. Размеры их чешуек меньше диаметра луча микронзонда, однако наблюдения в оптическом (“потоки”) и электронном микроскопах показали, что некоторые чешуйки образуют мономинеральные однородные агрегаты со стехиометрическими составами.

Иллит-сметиты ПСТ-матрицы образуют на диаграмме область, обособленную, в том числе и от иллит-сметитов бластокатаклазитов: в иллит-сметитах стекла растут железистость $Fe/(Fe+Mg)$, содержания Si, Na, падают содержания Al, K (рис. 3б). Вероятно, во вмещающих породах преобладает иллит ($I > Sm$), а в стекле, наоборот, сметит ($I < Sm$) и подгруппа в стекле образована при значительно более низких температурах — до $150^{\circ}C$ [2].

Остальные, нестехиометричные, составы в стекле близки к смешаннослойным, и, судя по параметру $\sum_{VI}(2,11-2,47)$ ф.е, представляют собой дисперсную смесь с преобладанием диоктаэдрических глинистых. Таким образом, в раскристаллизованном стекле доминируют смешаннослойные. Разумеется, факт их тотального развития требует проверки методом рентгеновской дифракции.

В нашем случае белые слюды играют особую роль при формировании ПСТ. Мусковит — единственный минерал, который полностью выплавляется из вмещающих, а иллит-сметиты — преобладающая фаза, которая кристаллизуется в стекле. Исходя из этого, в изученном участке стекла можно предположить смещение эвтектики к слюдам, что вполне согласуется с некоторыми примерами частичного плавления породы в ксенолитах [13]. С другой стороны, известны ситуации с приоритетным выплавлением кварц-полевошпатовой эвтектики [5]. В нашем примере также есть признаки выплавления гранитной эвтектики, о чём свидетельствуют снижение кварца, плагиоклазов в обломках-реликтах ПСТ по сравнению с их содержанием во вмещающих породах, повышение основности плагиоклаза в ряду гнейс—бластокатаклазит—обломки в ПСТ и изменение валового состава ПСТ по сравнению со вмещающими (рис. 3а). Обогащение расплава натрием подтверждается также обилием в стекле иллит-сметитов, гораздо более натриевых, чем минералы той же группы во вмещающих

породах (среднее содержание Na 0,11 и 0,03 ф.е. соответственно).

Увязать аргументы в пользу той или иной эвтектики можно, если принять во внимание, что эвтектический состав возможен лишь в начале выплавления при температуре солидуса и занимает небольшой объём. Вероятно, при частичном плавлении в условиях быстротечных сдвиговых деформаций трение, а значит, и нагрев, не могли быть тотальными и длительными. Существовали локальные горячие точки, вокруг которых началось плавление. Такие очаги могли возникать в лейкократовой и в слюистой части бластокатаклазита, но быстрота процесса не обеспечивала должного перемешивания порций расплава и могла приводить к неоднородности стекла по составу.

В рамках данной публикации умышленно оставлен “за скобками” вопрос условий и причин появления обильных иллит-сметитов в стекловатой матрице ПСТ — являются ли они результатом раскристаллизации расплава, типа каолиновых микролитов в бонинито-подобных лавах [6], или же могут быть продуктом последующей девитрификации стекла. Кроме того, выявленные нами две разновозрастные генерации иллит-сметитов (ориентированные и хаотичные) могут представлять эти оба способа раскристаллизации стекловатого субстрата ПСТ.

Таким образом, изучение двух разновидностей ПСТ показало, что они принадлежат к двум разным генетическим формам, образованным преимущественно механическим измельчением породы (Рыбачий—Средний) и её частичным плавлением (Северное Приладожье). С учётом результатов экспериментального воспроизведения псевдотахилитов при сейсмических скоростях сдвига [14], показавших, что измельчение и фрикционное плавление — взаимодополняющие, а не взаимоисключающие процессы, и образованию расплавленного псевдотахилита обязательно предшествует стадия механического измельчения породы, можно воспринимать рассмотренные нами ПСТ как результат проявления разных стадий единого процесса преобразований вещества в зоне динамической подвижки предположительно сейсмогенной природы. Пример ПСТ из Северного Приладожья также показал, что в ходе динамической подвижки предполагаемой сейсмогенной природы, вероятно уже на стадии свекофеннского орогенеза, породы с глубин 12–15 км были достаточно быстро выведены на приповерхностный уровень порядка 3 км, где и могло произойти “остеклование” частично расплавленной породной матрицы.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках ПФНИ Президиума РАН №8 и частично (в части, касающейся Приладожья) по теме № 0144–2014–0089 госзадания ФБГУН ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балувев А.С., Морозов Ю.А., Терехов Е.Н., Баянова Т.Б., Тюпанов С. Н. // Геотектоника. 2016. № 5. С. 3–35.
2. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: смектиты, смешаннослойные образования. М.: Наука, 1990. 212 с.
3. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: слюды, хлориты. М.: Наука, 1991. 176 с.
4. Морозов Ю.А., Смольская А.И., Кулаковский А.Л., Матвеев М.А. // Физика Земли. 2018. № 1. С. 3–25.
5. Попов В.С. Как образуются граниты // Сорос. образоват. журн. 1997. № 6. С. 56–63.
6. Шарков Е.В. и др. // ДАН. 2003. Т. 390. № 3. С. 389–393.
7. Lin A. // J. Struct. Geol. 1999. V. 21. № 5. P. 473–478.
8. Lin A. Fossil Earthquakes: The Formation and Preservation of Pseudotachylytes. B.; Heidelberg: Springer-Verlag. 2008. 348 p.
9. Martini J E. J. // J. Metamorphic Geol. 1992. V. 10. P. 517–527.
10. Maddock R.H. // Geology. 1983. V. 11. P. 105–108.
11. Shimamoto T., Nagahamo H. // J. Struct. Geol. 1992. V. 14. № 8/9. P. 999–1006.
12. Sibson R.H. // Royal. Astron. Soc. Geophys. J. 1975. V. 43. P. 775–794.
13. Sigurdsson H. // Geol. Mag. 1968. V. 105. № 5. P. 440–453.
14. Spray J.G. // Geology. 1995. V. 23. № 12. P. 1119–1122.
15. Wenk H.R. // Geology. 1978. V. 6. P. 507–511.

TWO GENETIC TYPES OF PSEUDOTACHYLYTES

Corresponding Member of the RAS Yu. A. Morozov, M. A. Matveev,
A. I. Smulskaya, A. L. Kulakovskiy

Institute of the Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Received May 14, 2018

The study of two varieties of pseudotachylytes (PST) in granitoids of the Riphean complex on the Barents Sea coast of the Kola Peninsula (Rybachii and Srednii peninsulas) and in metapsammite of the Paleoproterozoic complex in the Northern Ladoga region by a few independent analytical methods has made it possible to establish that they belong to different genetic forms, such as mechanically crushed rocks and melting products, respectively. As for the melting differences, we have given a detailed description of the mineral and material transformations of the original rock into the PST glass matrix and obtained evidence for the initial melting out of the micaceous eutectics with its subsequent shift to the granite type. The conclusion has been made on the most likely formation of molten PST due to frictional rock melting under rapid rise of its blocks from a depth of 12–15 km to the crustal surface (less than 3 km) along the faults of presumably seismogenic nature. It is suggested that crushing and frictional melting can be complementary, rather than mutually exclusive processes, and the formation of molten PST is commonly preceded by the mechanical rock crushing stage.

Keywords: pseudotachylyte, dynamic movement, mechanical crushing, frictional melting, eutectic.