

УДК 552.11;552.16;551.25550.4

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФРИКЦИОННОГО ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАПСАММИТОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОДВИЖКАХ (НА ПРИМЕРЕ ПСЕВДОТАХИЛИТОВ ПРИЛАДОЖЬЯ)

© 2023 г. Член-корреспондент РАН Ю. А. Морозов^{1,*}, М. А. Матвеев¹, С. Г. Скублов^{2,3},
А. И. Смульская¹, Е. Н. Терехов⁴, А. С. Ларьков¹

Поступило 24.10.2022 г.

После доработки 17.11.2022 г.

Принято к публикации 21.11.2022 г.

На основе анализов геохимии тектонических псевдотрахилитов и вмещающих их пород рассмотрены особенности перераспределения главных, редких и редкоземельных элементов в процессе сейсмогенного фрикционного плавления метатерригенных пород аркозового типа из трех разнотемпературных зон регионального метаморфизма (зеленосланцевая, амфиболитовая, гранулитовая) Северного Приладожья. Выявлены разнонаправленные тренды в изменениях содержаний оксидов главных элементов в триаде протолит–бластокатаклазит–псевдотрахилит, но при этом установлено однонаправленное повышение основности фрикционного расплава в сравнении с протолитом. Рассмотрены геохимические свидетельства частичного избирательного плавления исходных пород. Показаны особенности фракционирования редких и редкоземельных элементов при переходе в расплав протолитового материала, а также при последующей его частичной раскристаллизации. Отмечено проявление пика повышенных содержаний европия относительно протолита в расплавленном матриксе всех трех точек опробования. По изменениям концентраций этих элементов в зонах генерации псевдотрахилитового субстрата, в участках его перемещения и нагнетания даны оценки их дифференциальной мобильности при фрикционном плавлении в зоне динамической подвижки.

Ключевые слова: псевдотрахилиты, бластокатаклазиты, фрикционное плавление, сейсмическая подвижка, геохимия, главные, редкие, редкоземельные элементы

DOI: 10.31857/S2686739722700086, **EDN:** THKFVM

Особенности процессов структурно-вещественного и минерально-фазового преобразования горных пород, происходящих на фоне и с участием тектонических деформаций, включают несколько взаимосвязанных аспектов: влияние стресса на термодинамические параметры метаморфизма [1], его воздействие на кинетику синдеформационных реакций, на их трибохимический характер, на реологию и геомеханические свойства пород [2]. Все эти особенности наиболее ярко бывают проявлены в зонах локализованных деформаций и разломов, включая сейсмогенные,

где такие процессы быстротечно реализуются в условиях повышенных температур, давлений, стресса, скоростей динамических подвижек и с участием флюидного компонента. Одним из важных аспектов такого рода преобразований является фрикционное плавление геоматериала, которое, как показывают натурные наблюдения и эксперименты [3, 4], происходит только при достижении сейсмических скоростей смещения по разлому, т.е. около или более 1 м/сек, и после значительного механического дробления пород. Конечным продуктом таких преобразований являются тектонические псевдотрахилиты (ПСТ) – афанитовый, часто стекловатый материал с переменной долей обломков минералов и микрофрагментов протолита, преимущественно инъекционно-жильных форм обособления, пространственно и генетически связанных с разломными тектонитами (милониты, катаклазиты, глинки трения, брекчии). Вопросы генезиса и условий формирования ПСТ являются предметом рассмотрения специалистами самых разных дисциплин – геологов, петрологов, геохимиков, сейсмологов, геомехаников, т.е., по сути, представляют проблему

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт геологии и геохронологии докембрия
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

⁴Геологический институт Российской академии наук,
Москва, Россия

*E-mail: frost@ifz.ru

междисциплинарных исследований в науках о Земле.

При изучении ПСТ, связанных с зонами палеоземлетрясений в комплексах самого разного возраста и геоструктурного положения, нами уже были кратко освещены некоторые аспекты их генезиса и морфоструктурных разновидностей, петрогенеза, геодинамических и геомеханических условий формирования [5–8]. Было показано, что, помимо интенсивного механического дробления геоматериала, важнейшую роль в их образовании играют процессы связанного с ним фрикционного селективного плавления минеральных фаз субстрата. В этой связи отдельным, но тесно взаимосвязанным с прочими, направлением исследований ПСТ является геохимическое изучение продуктов плавления породного вещества, включающее ряд вопросов о перераспределении химических элементов при происходящих фазовых превращениях первого рода. Эти вопросы, составляющие цель и задачи настоящей публикации, включают следующие аспекты: какие из главных, редких и редкоземельных элементов вовлекаются в процессы плавления, а какие сохраняются в рестите или выносятся из зоны подвижки; в каких пропорциях перераспределяются те или иные компоненты между протолитом, расплавом и реститом, какие из них участвуют в раскристаллизации расплава; есть ли различие в поведении элементов при селективном плавлении субстрата схожего исходного состава, но разных уровней метаморфизма; наконец, существуют ли значимые отличия составов ПСТ около генерирующих их поверхностей сместителей (ПСТ_{ГП}) и в местах (трещинах) нагнетания перемещенного расплава (ПСТ_{ТН}).

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПСТ В СЕВЕРНОМ ПРИЛАДОЖЬЕ: ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И ИХ МИНЕРАЛЬНО-ПЕТРОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

ПСТ в Приладожье впервые были выявлены, описаны и датированы нами ранее [5, 6] в пределах практически всех зон (от зеленосланцевой до гранулитовой) зонально метаморфизованного, палеопротерозойского ладожского комплекса свекокарелид (1.89–1.75 млрд лет) юго-восточной части Фенноскандии. Их формирование происходило в метатерригенном флишоидном субстрате преимущественно исходно аркозового типа (продукты размыва и переотложения архейских гранито-гнейсов) на посторогенной стадии развития перикратонной окраины Карельского массива в раннем-среднем рифее, в период заложения там Пашско-Ладожского грабена [6], т.е. на спаде или в самом конце тектоно-термальной активности региона. Практически во всех участках

развития ПСТ выявляется их тесная пространственно-генетическая связь с предшествующими им катаклазитами и бластокатаклазитами (БКТ) по слюдыстым сланцам и гнейсам ладожского комплекса, сформированным на орогенной стадии (1.79–1.75 млрд лет). В этой связи аналитические исследования в каждой точке отбора ПСТ охватывали триаду образцов, включая: 1) исходные метапсаммиты (протолит) разной степени метаморфизма, 2) БКТ по ним, частично преобразованные в условиях наложенного зеленосланцевого диафтореза, 3) собственно ПСТ, преимущественно жильно-инъекционных форм обособления. Минерально-фазовый состав образцов триады при некоторых вариациях в каждой из точек опробования, в целом, был близок, в той степени, в какой это возможно при метаморфизме умеренных давлений андалузитового типа исходно схожих толщ чередования метапелитов и метапсаммитов. Наиболее типичный набор минералов протолитов включал, помимо кварца, калиевые и натровые полевые шпаты, филлосиликаты (биотит, мусковит), рудные (магнетит, ильменит, гематит и др.) и акцессории (сфен, циркон, монацит и др.). На стадии диафтореза наиболее широко была проявлена хлоритизация слюд и гидротермальные изменения, выраженные в заполнении трещин кварц-хлорит-калишпатовым агрегатом и ростом порфиробластического хлорита. ПСТ тоже местами подверглись более позднему гидротермальному воздействию в виде локально наложенных на их стекловатый матрикс сетевидных форм преимущественно хлоритовых агрегатов. При этом следует особо отметить, что породы, вмещающие ПСТ в пределах гранулитовой зоны представлены плагио-ортоклазовыми слюдыстыми гнейсами, местами с реликтами гиперстена, и подверглись процессам наложенной гранитизации, в результате чего, либо уже утратили черты флишоидности исходных толщ, хорошо распознаваемые в более низкотемпературных зонах, либо изначально представляли собой огнейсованную интрузивную породу. Характеристика особенностей процессов фрикционного плавления и последовательности селективного плавления разных минералов (сначала мусковит ~650°C, затем биотит ~850°C, в небольших объемах плагиоклаз ~1100–1200°C и калиевый полевой шпат, минимально кварц ~1600°C) и последующей кристаллизации новых минеральных фаз в стекле, с учетом модельных оценок ликвидусных и солидусных температур по программе MELTS, была представлена в специальной публикации [8]. Здесь же мы ограничимся лишь кратким описанием минеральных парагенезисов элементов триады в каждой из трех точек опробования ПСТ в пределах зеленосланцевой, амфиболитовой и гранулитовой зон метаморфизма (рис. 1).

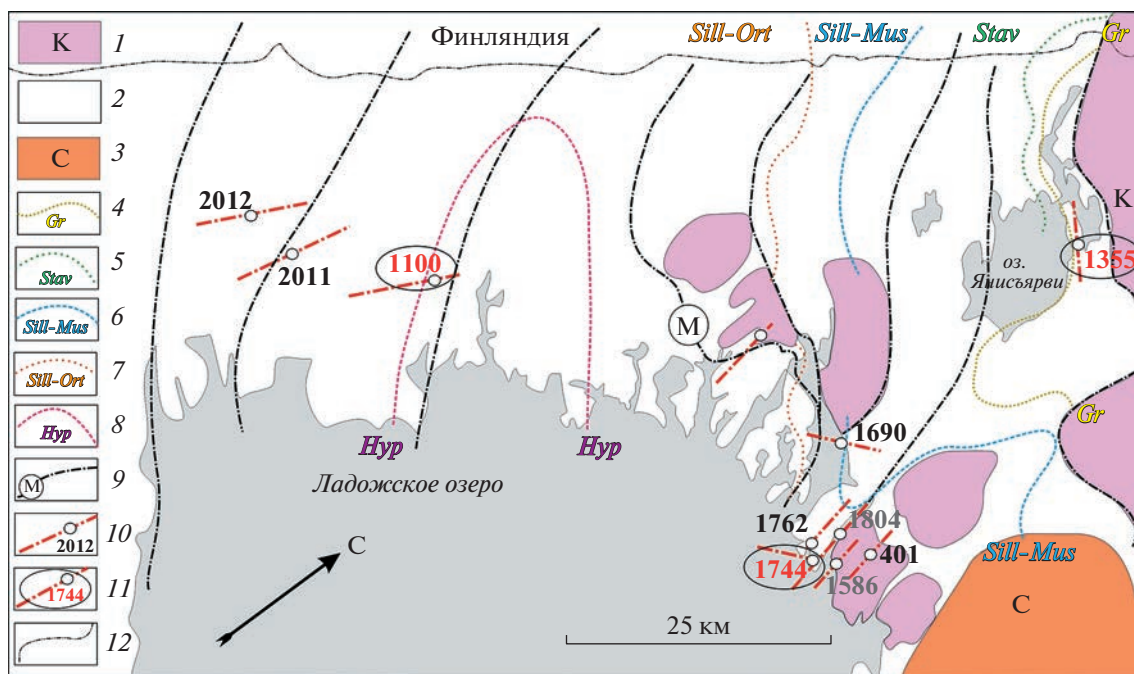


Рис. 1. Схема метаморфической зональности ладожского комплекса с местоположением точек выявленных и опробованных ПСТ [6]. 1 – Карельский массив; 2 – ладожский комплекс; 3 – Салминский массив гранитов-рапакиви; 4–8 – изограды метаморфизма: граната, ставролита, силлиманита-мусковита, силлиманита-ортоклаза; гиперстена, соответственно; 9 – крупнейшие разломы и Мейерский надвиг (М); 10 – разломы с выявленными ПСТ; 11 – точки геохимического опробования ПСТ, рассматриваемые в статье; 12 – государственная граница с Финляндией.

В низкотемпературной части разреза ладожского комплекса (точка ЛВ-1355) ПСТ-прожилки располагаются в слабо текстурированном металевролитовом субстрате (рис. 2 а, б) с реликтами псаммитовых структур, который по уровню метаморфических преобразований относится к биотит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации и сложен преимущественно ассоциацией биотит-хлорит-мусковит-альбит-кварц. Вместе с тем в смежных объемах встречаются горизонты, обогащенные углеродом, местами с хлоритом, актинолитом и карбонатом, указывающими на контаминацию исходного субстрата вулканогенно-осадочным материалом из близлежащей подстилающей толщи верхнеятулийского комплекса. В этой точке для всех проанализированных разностей ПСТ в качестве протолита для изучения взят только метапсаммит, так как непосредственно в обнажении флишеидная расслоенность выражена слабо и доля метапелитов ничтожна. Помимо метапсаммита (ЛВ-1355/3), нами были опробованы БКТ на экзоконтактах ПСТ прожилков (ЛВ-1355/1-2 и ЛВ-1355/5-2). Сам афанитовый субстрат ПСТ анализировался отдельно (рис. 2 а, б), соответственно, возле генерирующей поверхности (ПСТ_{ГП} = ЛВ-1355/1-1) и в участке нагнетания (в трещине) перемещенного расплавленного материала (ПСТ_{ТН} = ЛВ-1355/5-1). Кроме того, валовый состав ПСТ измерялся, как вместе

с обломками протолита, так и отдельно в объемах между обломками, заполненных раскристаллизованным микролитами расплавом.

В силлиманит-мусковитовой зоне ПСТ (точка ЛВ-1744) пересекают толщу дробного флишеидного чередования метапелитов и метапсаммитов (рис. 2 в), представленных, соответственно, существенно слюдястыми, гранатсодержащими гнейсами (ЛВ-1744–3А) и кварц-полевошпатовыми двуслюдяными метапсаммитами (ЛВ-1744–3Б). Здесь также, помимо субстрата самих ПСТ (рис. 2 г), которые были опробованы на генерирующей поверхности (ЛВ-1744/8-1) и в трещине нагнетания расплава (ЛВ-1744/4-1), для аналитического изучения был отобран материал сопряженных с ними в экзоконтакте БКТ, предшествующих стадий разрывообразования (ЛВ-1744/4-2 и ЛВ-1744/8-2).

В пределах зоны гранулитовой фации (рис. 2 д, е) многочисленные ветвистые прожилки черного стеклоподобного матрикса ПСТ (ЛВ-1100-1) были выявлены в зоне разломных БКТ (В-1100-2), секущих крупнокристаллические двуполевошпатовые слюдястые гнейсы (ЛВ-1100-3А), в некоторых участках с жильными обособлениями крупнозернистого гранитоидного материала (ЛВ-1100-3Б), который по соотношению суммы щелочей и кремнезема близок к субщелочным гранитам.

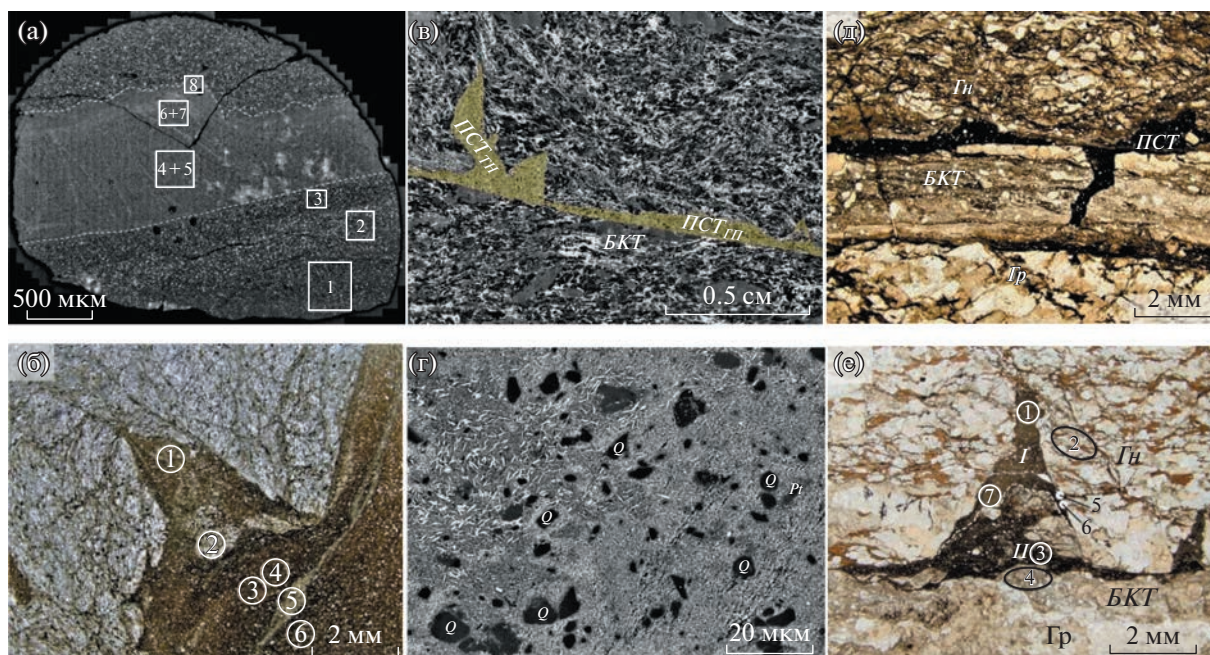


Рис. 2. Прожилки ПСТ во вмещающих породах и ассоциированных БКТ по ним в зонах: биотит-хлоритовой – точки ЛВ-1355-1 (а) и ЛВ-1355-5 (б); силлиманит-мусковитовой – точки ЛВ-1744-4 (в) и ЛВ-1744-8 (г); в зоне гранулитового метаморфизма – точки ЛВ-1100-Б-Гнейс (д) и ЛВ-1100-Б-Гранит (е). Цифрами обозначены участки опробования на СЭМ, упоминаемые в тексте и представленные в таблице валовых составов (табл. 1). Гн – гнейсы, Гр – граниты, БКТ – бластокатаклазиты, ПСТ_{ГП} – псевдотахилиты генерирующих поверхностей, ПСТ_{ТН} – псевдотахилиты трещин нагнетания. а, в, г – BSE-изображения; б, д, е – оптическая микроскопия.

Сама ПСТ-матрица во всех точках наблюдения сложена, помимо мелких обломков минералов протолита (плагноклаз, кварц, редко биотит), микроразмерным агрегатом микролейст биотита и диоктаэдрической белой слюды, выкристаллизовавшихся из расплавленного материала (рис. 2 г), а также остаточным витрифицированным расплавом кварцевого и/или плагноклазового состава в интерстициях микролейст.

Все отмеченные различия в исходном составе и степени наложенных метаморфических преобразований опробованных образцов триады для каждого из участков нашли определенное отражение в общем валовом составе (табл. 1) и в положении на петрогенетических вариационных диаграммах для метасадочных пород (рис. 3 а) и плутонических серий (рис. 3 б) [9, 10]. ПСТ, ассоциированные с БКТ, и их вмещающие породы точки ЛВ-1355 заняли положение ближе к граувакковым образованиям, в то время как отчетливо флишоидный гнейсовый субстрат точки ЛВ-1744 вместе с БКТ и ПСТ попал ближе к полю пелитов (рис. 3а). В противоположность этому составы пород триады из гранулитовой зоны (ЛВ-1100) заняли положение в поле гранодиоритов и гранитов (рис. 3 б), указывая в пользу варианта их исходно апомагматической природы.

МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ валовых проб на главные, редкие и редкоземельные элементы (REE) проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 по стандартной методике (ВСЕГЕИ). Относительная погрешность определения элементов не превышает 5–10%. Нижние пределы обнаружения колеблются в пределах 0.0002–0.01% для главных и 0.005–0.01 ppm для большинства редких и REE элементов. Часть аналитических данных, в частности валовые составы протолитов, бластокатаклазитов и отдельных участков ПСТ прожилков, получена на СЭМ “Tescan” Mira LMS с энергодисперсионным (EDX) спектрометром Ultim Max 65 Центра коллективного пользования ИФЗ РАН. При этом валовый состав ПСТ изучался на участках с обломками, а состав собственно расплава – в безобломочной матрице.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ГЕОХИМИИ ПСТ И ИХ ПРОТОЛИТОВ

Анализ валовых составов ПСТ в сравнении с вмещающими их породами, а также сопоставление составов образцов из элементов триады меж-

Таблица 1. Валовые содержания главных элементов (в мас. %) в матрице ПСТ (желтый фон), во вмещающей их исходной породе (голубой фон) и в БКТ по ней (зеленый фон)

№ п/п	Проба	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	LOI*
1	ЛВ-1355/1_ПСТ_генерир. пов. с обл. Участок 4, рис. 2а	1.63	2.20	15.35	58.38	4.15	0.95	0.53	5.28	88.47	11.53
2	ЛВ-1355/1_ПСТ_генерир. пов. без обл. Участок 5, рис. 2а	0.31	3.47	27.38	48.82	9.06	0.21	0.55	7.45	97.25	2.75
3	ЛВ-1355/1_БКТ_реликт в матрице ПСТ. Участок 10, рис. 2а	3.01	2.48	18.50	64.09	4.19	1.46	0.71	6.18	100.62	—
4	ЛВ-1355/5-1_ПСТ_нагнетания. Участок 1 с обл., рис. 2б	1.93	2.26	15.46	57.29	4.07	1.04	0.56	5.55	88.16	11.84
5	ЛВ-1355/5-2_БКТ. Участок 2, рис. 2б	2.82	2.23	15.78	63.42	3.24	1.53	1.08	5.99	96.09	3.91
6	ЛВ-1355/5-3_ПСТ_генерир. пов. Участок 3, с обл., рис. 2б	2.24	2.27	15.90	59.96	3.84	1.30	0.65	5.74	91.9	8.01
7	ЛВ-1355/5-4_ПСТ_генерир. пов. Участок 4, без обл., рис. 2б	3.48	3.40	20.94	51.69	4.50	2.07	0.75	0.75	87.58	12.42
8	ЛВ-1355/5-5_ПСТ_генерир. пов. Участок 5, с обл., рис. 2б	2.81	2.34	16.87	63.13	3.69	1.45	0.63	5.81	96.73	3.27
9	ЛВ-1355/5-6_ПСТ_генерир. пов. Участок 6, без обл., рис. 2б	2.25	3.49	21.87	50.79	4.96	1.74	0.77	8.46	94.33	5.67
10	ЛВ-1355/5-3_протолит-метапсаммит	2.23	2.28	15.96	59.93	3.08	1.15	0.53	5.80	90.96	9.04
11	ЛВ-1744/4-1 ПСТ трещины нагнетания	2.42	2.51	16.90	61.30	4.33	0.89	0.66	6.11	95.12	4.88
12	ЛВ-1744/4-2 БКТ экзоконтакта ПСТ-прожилка	2.69	2.05	15.80	67.20	3.45	1.37	0.57	5.40	98.53	2.47
13	ЛВ-1744/8-1 ПСТ генерирующей поверхности	1.92	2.57	18.90	58.80	4.27	0.69	0.75	6.10	94	6.00
14	ЛВ-1744/8-2 БКТ экзоконтакта ПСТ-прожилка	1.81	2.64	16.80	62.00	4.45	0.80	0.70	6.77	95.97	4.03
15	ЛВ-1744-3А Протолит - метапелит	2.66	2.67	16.80	61.50	4.03	1.24	0.70	7.40	97	3.00
16	ЛВ-1744-3Б Протолит - метапсаммит	3.46	1.68	13.10	70.80	1.84	1.89	0.51	5.67	98.95	1.05
17	ЛВ-1100-Б_Участок 1_ПСТ_I с обл., рис. 2е	1.39	3.35	17.94	53.35	4.60	0.76	1.21	6.84	89.44	10.56
18	ЛВ-1100-Б_Участок 2_Протолит_Гнейс	2.67	1.80	9.62	65.73	1.37	1.21	0.67	3.01	86.08	13.92
19	ЛВ-1100-Б_Участок 3_ПСТ_II с обл., рис. 2е	3.03	1.94	15.18	63.06	3.69	1.38	0.85	3.08	92.21	7.79
20	ЛВ-1100-Б_Участок 4_БКТ по граниту, рис. 2е	5.21	1.06	15.74	66.83	0.90	2.26		3.09	95.09	4.91
21	ЛВ-1100-Б_ПСТ_I_Участок 5, без обл., рис. 2е		5.52	21.97	45.16	8.65	0.35	0.64	5.40	87.69	12.31
22	ЛВ-1100-Б_ПСТ_I_Участок 6, без обл., рис. 2е		8.32	20.41	37.12	6.25	0.31	1.32	14.36	88.09	11.91
23	ЛВ-1100-Б_ПСТ_I_Участок 7_ без обл., рис. 2е		5.04	22.53	46.42	8.00	0.59	0.47	6.12	89.17	10.83
24	ЛВ-1100-Б_Протолит_гранит	1.87	0.43	13.60	73.40	7.26	0.42	0.27	2.34	99.59	0.41

Примечание. *Содержание LOI (потери при прокаливании) в образце определялось как разница между 100% и суммой мас. % оксидов.

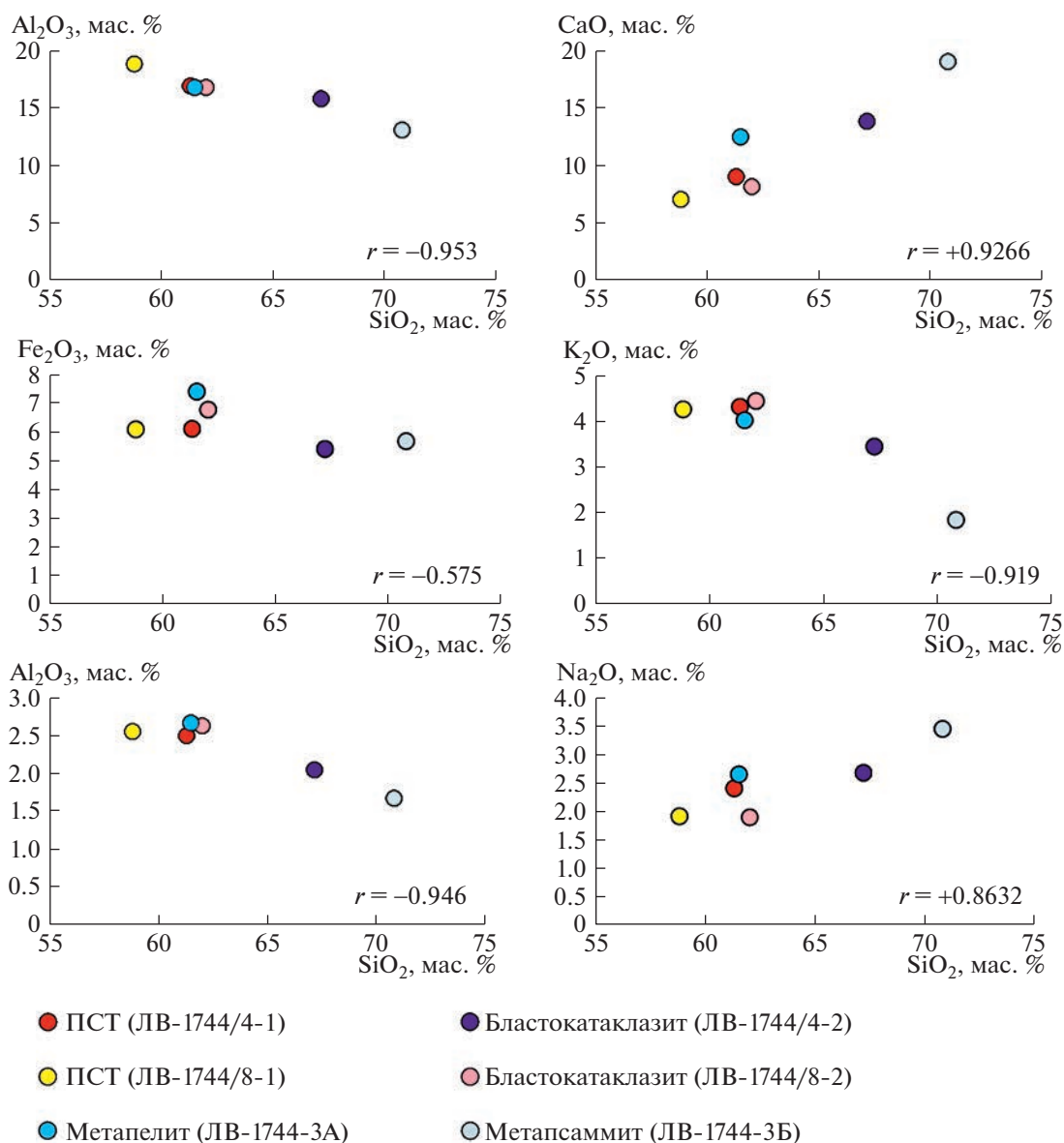


Рис. 4. Бинарные диаграммы оксидов главных элементов в триаде “Протолит–БКТ–ПСТ” точки ЛВ-1744. r – рассчитанные значения коэффициентов корреляции для рассмотренных пар оксидов.

лютного содержания в трех рассматриваемых разностях триады. В качестве главенствующей тенденции следует отметить общее повышение основности субстрата ПСТ относительно и БКТ и протолита, исходя из устойчивого снижения содержания кремнезема в ряду рассматриваемой триады (от 75% в граните и 65–70% в гнейсах, через 62–67% в БКТ, до 53–58% в ПСТ с обломками протолита). Более того, отдельные замеры раскристаллизованной матрицы ПСТ между видимыми обломками кварца и плагиоклаза показывают приближение состава по этому оксиду к ультраосновному расплаву (строки 2, 7, 9 и 21–23 в табл. 1). Изменения содержаний других главных элементов, даже при невысоких вариациях абсо-

лютных значений, также показывают определенные тенденции, лучше всего видимые на бинарных диаграммах оксидов в точке ЛВ-1744 (рис. 4), показывающих разнонаправленные тренды повышения или снижения их концентраций в ряду Протолит (метасаммиты и метапелиты)–БКТ–ПСТ.

Можно видеть, что во всех парах оксидов ПСТ занимают крайнее положение в линиях этих трендов и их составы сближаются с составами метапелитов, уходя достаточно далеко от состава метасаммита. БКТ занимают промежуточное положение между протолитом и ПСТ. Исходя из выявленных трендов, в расплавной матрице отчетливо возрастает содержание Al, Mg, K; содержание

железа увеличивается в сравнении с исходным метапсаммитом, но немного падает по сравнению с метапелитом, что может быть результатом значительного плавления биотита и тем фактом, что в этом месте разлом затронул преимущественно метапсаммиты, но мало коснулся, собственно, метапелитов (доля последних в обнажении в три раза меньше, чем метапсаммитов). В противоположность этому, концентрация Са и Na заметно снижается.

Можно полагать, что обогащение названными элементами связано с их поступлением из мусковита и биотита, а дефицит кальция и натрия, как и разнонаправленность трендов двух щелочных элементов — калия и натрия — с незначительным вовлечением плагиоклаза в плавление в сравнении со слюдами. Вполне вероятно, что эта тенденция могла зародиться еще на стадии бластокактаклаза, когда плагиоклазы матрицы протолита подверглись серицитизации, и затем была усилена процессами избирательного частичного плавления. С учетом отмеченной общей тенденции по кремнезему, все эти изменения вполне согласуются с упомянутой выше последовательностью и степенью вовлечения в избирательное фрикционное плавление основных породообразующих минералов рассматриваемых пород — в полной мере мусковита, в значительной части биотита, частично плагиоклаза и в наименьшей степени кварца [8].

На этом общем фоне заслуживает внимания еще один интересный аспект перераспределения главных элементов при фрикционном плавлении, выраженный в несхожести составов расплава около генерирующих поверхностей (ПСТ_{ГП}) и в участках (трещинах) его нагнетания (ПСТ_{ТН}). Сравнение валовых составов этих двух разновидностей ПСТ показывает их определенные различия (табл. 1): первые занимают крайнее положение в трендах с повышающимися содержаниями алюминия и магния, содержание в них железа несколько растет, но при этом снижается во второй разности; доля калия возрастает только в перемещенном расплаве, но сохраняется неизменной на генерирующей поверхности, а концентрация натрия практически не меняется в обеих модификациях ПСТ. Все отмеченные особенности затрагивают вопрос миграции элементов в расплаве и, либо указывают на относительную мобильность одних и инертность других, либо на их принадлежность к разным порциям неоднократно формировавшегося в разломе расплава с несколько разной “основностью”, существенно влияющую на подвижность (вязкость) и дальность перемещения в зоне разлома [8]. Для оценки и визуализации этого были несколько подробнее изучены вариации составов расплава в пределах трещин

нагнетания и около ограничивающих их прямых зон генерации ПСТ.

В точке ЛВ-1355-5 из низкотемпературной зоны были измерены составы ПСТ (раздельно, с обломками протолита и без них) у вершины клиновидной трещины и у ее основания в зоне генерирующей поверхности (рис. 2 б, табл. 1 — строки 4, 6–9). Сравнение составов показывает, что заметно возрастает основность перемещенного в трещину расплава относительно содержания SiO₂ в БКТ и в отдельных полосах зоны генерации. Одновременно с этим в последней, в целом, заметно выше содержание глинозема, оксидов натрия и железа, которые, вероятно, более инертны в расплаве и накапливаются в полосе генерации.

Такое же сопоставление было сделано в трещине нагнетания расплава в ПСТ-прожилках гранулитовой зоны, точка ЛВ-1100-Б (рис. 2 е, табл. 1 — строки 17, 19, 21–23), где даже чисто визуальное сравнение с помощью оптической микроскопии расплавных матриц у вершины трещины, а также вдоль ее обеих бортов (домен I), и у ее основания, входящего в зону генерирующей поверхности (домен II), показывает их заметное различие по оттенкам и сложению. Первый домен заполнен замутненным, коричневатобурым материалом с незначительным количеством мелких обломков кварца и плагиоклаза, в то время как второй — темно-коричневым, почти черным, афанитовым субстратом с обилием крупных и мелких фрагментов протолита. Сопоставление измеренных составов показывает существенную разницу между двумя порциями расплава в этих доменах: если субстрат в зоне генерирующей поверхности (участок 3 на рис. 2 е и строка 19 в табл. 1), содержит кремнезем в диапазоне 60–65%, то заполнение первого домена, в целом, отличается гораздо меньшим содержанием SiO₂ (43–45%), местами достигающим 35–38% SiO₂ (участок 6), т.е. характеризуется ультраосновным составом. Матрица ПСТ в зоне генерации более магнезиальная и глиноземистая, заметно больше концентрирует в себе калия и железа.

Исходя из этих примеров можно полагать, что повышенной способностью к перемещению и нагнетанию обладает именно более основной расплав, ввиду его пониженной вязкости, а более кислый расплав, сгенерированный на поверхностях смещений, остается в пределах полосы сместителя. Однако возможен и другой вариант — заполнившая трещину *более ранняя* порция расплава, созданная за счет наиболее легкоплавких слюдястых фаз, блокируется *более поздней* генерацией, в которой в частичное плавление по мере развития подвижки была дополнительно вовлечена некоторая доля плагиоклаза и кварца, что повысило концентрацию кремнезема, и этот расплав, как более вязкий, оставался в зоне подвиж-

Таблица 2. Концентрации (ppm) редких и REE элементов в триадах исследуемых образцов (Протолит–БКТ–ПСТ) из трех точек опробования

№ точки	Be	Ba	Sr	Rb	Cs	Sc	Cr	V	Pb	Zr	Nb	Hf	Ta	W	Th	U	Co	Ni	Mo	Sn	Cu	Zn	Ga
1 ЛВ-1355/1-1	1.89	588	131	242	10.8	13.2	108	88.5	20.3	121	12	3.39	1.17	2.91	12.7	3.2	16.6	50.4	0.61	3.49	36.7	95.9	18.5
2 ЛВ-1355/1-2	2.4	577	148	146	7.63	13.6	98.9	87.9	20.5	120	11.8	3.51	1.17	2.61	11.9	2.86	18.6	55.8	0.6	2.67	44.4	113	20
3 ЛВ-1355/5-1	1.85	580	165	211	10.9	14.3	125	95.7	18.7	148	13.9	4.21	1.34	2.73	14.1	3.3	18.6	58	0.62	2.99	41.1	96.8	20.8
4 ЛВ-1355/5-2	2.1	657	161	220	11	15.3	128	97.5	22	147	13.7	4.2	1.34	3.08	14.6	3.48	19.1	64.6	0.84	4.06	48	104	21.5
5 ЛВ-1355/5-3	2.47	728	147	189	9.62	15.7	129	105	21.6	164	15.1	5.07	1.48	2.52	15.2	3.31	20	60.5	0.6	3.37	37.3	104	23.5
6 ЛВ-1744/4-1	1.93	731	161	184	5.24	15.3	102	105	29.9	157	15.1	4.67	1.35	3.64	13.1	3.69	100	48.7	0.6	3.13	38.5	113	22
7 ЛВ-1744/4-2	2.41	578	192	156	6.61	13.9	86.5	81.6	25.7	161	12.6	4.57	1.3	3.64	12.2	3.28	14	42.7	0.87	2.99	29.3	80.7	19.2
8 ЛВ-1744/8-1	2.53	847	142	164	3.68	18.2	121	119	17.8	158	15.8	4.63	1.49	5.16	15	3.84	268	53.4	0.6	4.11	22.2	105	26.2
9 ЛВ-1744/8-2	1.97	672	137	197	7.12	15.6	135	113	20	127	15.2	3.6	1.3	5.16	12.2	3.39	18.4	63.4	0.6	3.05	36.8	104	21.8
10 ЛВ-1744-3А	2.09	597	188	199	8.61	17.4	111	108	22.7	201	15.3	5.64	1.45	1.95	15.3	3.98	18.2	59.5	1.21	3.28	22.7	102	22.8
11 ЛВ-1744-3Б	2.46	324	220	103	4.54	11.1	87.4	66.8	25.6	178	9.91	4.92	1.03	1.12	11	2.7	13.1	50.3	2.12	1.88	33.2	68.8	13.6
12 ЛВ-1100-1	1.63	608	133	142	1.27	17.4	123	143	19.2	315	17.2	8.35	1.37	3.47	20.6	3.62	258	77.2	5.04	1.8	51.6	269	20.5
13 ЛВ-1100-2	1.52	169	117	93.8	1.48	15.6	114	117	13.6	392	13.1	10.4	0.8	3.47	20.6	3.62	12.7	55.1	1.94	1.17	43.1	109	18.5
14 ЛВ-1100-3А	2.09	226	136	111	2.03	12.8	94.4	91.2	15.2	310	11.1	8.17	0.8	1.65	15.4	2.96	11.9	50.5	1.49	0.85	36.3	92.7	16.8
15 ЛВ-1100-3Б	1	1440	243	151	0.34	5.38	15.1	17.3	73.4	194	12.7	6.78	0.44	1.26	46.9	2.78	4.58	21.3	4.79	1.02	35.6	54.3	18.9

ки. При этом нельзя исключать и третий вариант, когда вариативность составов разных порций расплава в зоне его генерации может быть связана с неоднородностью самого протолита, вспарываемого разломом. Еще одна причина изменчивости составов ПСТ от места к месту связана с развигением в их матрице полосчатости (рис. 2 б), механизмы формирования которой частично рассмотрены нами в другой публикации [8]. Здесь же мы только констатируем, что в этих полосках фиксируются существенные различия содержания главных элементов (табл. 1, строки 6–9, 19–23), допускающие в качестве возможных причин как дифференциацию расплава при его остывании, так и разновременное поступление порций расплава из разных источников. Последнее отражается в их различиях как по структуре, так и по составу матрицы (рис. 2 г), что также свидетельствует о малом перемешивании разновременных порций расплавов.

Вариативность концентраций редких и REE элементов в триаде Протолит–БКТ–ПСТ. Аналитические результаты измерения содержания этих элементов в разностях триады представлены в табл. 2 и 3. Общий характер распределения одних только REE в исходных породах, в катаклазированных и расплавных производных, на первый взгляд, соответствует изохимическому варианту изменений, с однотипными вариациями содержания во всех трех точках опробования, за исключением гранитного жильного протолита ЛВ-1100-3Б (рис. 5). Однако детальное рассмотрение всех полученных данных показывает более сложную картину с разнонаправленными изменениями концентраций различных групп и отдельных элементов.

С учетом отмеченной выше двухэтапной последовательности преобразований пород в рассматриваемых разломных зонах (низкотемпературный бластокатаклиз → фрикционное плавление), вариации содержания оценивались отдельно в парах “Протолит–БКТ” и “БКТ–ПСТ”. Изменение массы (%) каждого из элементов рассчитывалось по аналогии с подходом [12] следующим образом: $[(\text{БКТ} - \text{Протолит})/\text{Протолит}] \times 100$; $[(\text{ПСТ} - \text{БКТ})/\text{БКТ}] \times 100$.

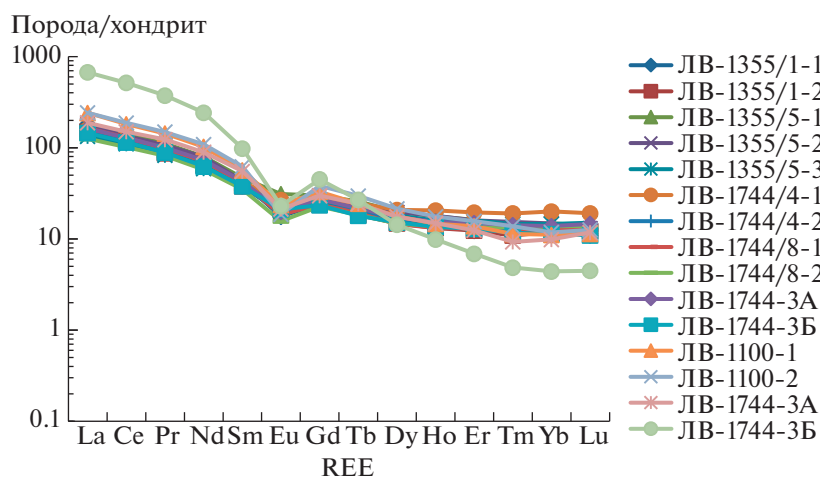
Этап бластокатаклаза в паре “Протолит–БКТ”. Как видно из диаграмм (рис. 6), на стадии механического разрушения и частичной перекристаллизации минералов в разломах, сопровождавшихся, как правило, гидротермальными изменениями субстрата (хлоритизация, серицитизация, альбитизация) в разных группах редких элементов проявляются несколько различные тенденции изменений их содержания. Некоторые литофильные элементы (Be, Ba, Sc) в низкотемпературной зоне хлоритовой субфации (ЛВ-1355) имеют склонность к снижению концентраций,

Таблица 3. Концентрации (ppm) редкоземельных элементов (REE) в триадах исследуемых образцов (Протолит–БКТ–ПСТ) из трех точек опробования

	№ точки	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	ЛВ-1355/1-1	21.3	43.2	77.4	9.25	34.5	6.29	0.99	4.84	0.73	3.87	0.78	1.97	0.3	1.95	0.27
2	ЛВ-1355/1-2	20.5	35.6	72.7	8.07	29.5	5.6	1.16	4.72	0.66	3.66	0.72	1.98	0.27	1.92	0.3
3	ЛВ-1355/5-1	28.2	44.4	86.1	10.3	36.5	6.93	1.75	5.97	0.93	4.9	0.97	2.59	0.34	2.4	0.34
4	ЛВ-1355/5-2	26.1	42.3	82.1	9.89	36	6.42	1.33	5.93	0.84	4.82	0.98	2.56	0.38	2.38	0.32
5	ЛВ-1355/5-3	23.7	31.6	67.9	7.67	27.1	5.68	1.11	4.96	0.76	4.44	0.87	2.55	0.36	2.35	0.37
6	ЛВ-1744/4-1	29.4	37.2	76.1	8.88	32.2	6.23	1.5	5.49	0.89	5.12	1.12	3.12	0.47	3.22	0.47
7	ЛВ-1744/4-2	22.4	35.3	71.6	8.36	29.2	5.55	1.11	4.69	0.73	4.02	0.86	2.18	0.31	2.1	0.31
8	ЛВ-1744/8-1	19.6	38.7	78.8	9.07	32.7	6.15	1.04	4.76	0.69	3.59	0.72	2.07	0.29	2.05	0.31
9	ЛВ-1744/8-2	21.3	29.7	62.2	7.56	26.3	5.18	0.88	4.5	0.66	3.64	0.75	2.16	0.33	2.21	0.34
10	ЛВ-1744-3А	23	38.5	78.7	9.3	33.3	6.35	1.12	5.4	0.78	4.28	0.84	2.39	0.35	2.23	0.36
11	ЛВ-1744-3Б	20	34.4	70.2	8.23	28.5	5.59	1.19	4.66	0.65	3.73	0.74	2.07	0.29	1.82	0.27
12	ЛВ-1100-1	22	57.2	111	13.3	46.8	8.39	1.33	6.55	0.88	4.36	0.8	2.21	0.28	1.79	0.28
13	ЛВ-1100-2	25.3	57.3	115	13.8	49.7	9.17	1.05	7.61	1.07	5.29	0.96	2.5	0.34	1.9	0.31
14	ЛВ-1100-3А	21	44.6	91.8	11.4	40.8	8.17	1.2	5.95	0.88	4.31	0.81	1.99	0.23	1.59	0.29
15	ЛВ-1100-3Б	13.2	159	316	34.7	111	14.5	1.3	8.95	0.97	3.53	0.54	1.1	0.12	0.71	0.11

т.е., по-видимому, выносятся из зоны разлома флюидами, при том, что другие (Sr, Rb, Cs) накапливаются в измененных минералах. Можно также отметить характерные для биотитов [13] в ассоциации с мусковитом повышенные концентрации Rb, Ce и Y. В более высокотемпературных зонах (ЛВ-1744, ЛВ-1100) часть элементов меняется местами – группу обогащения составляют Ba, Rb, Sc, а содержание Sr уменьшается. Такая же резко дифференцированная картина наблюдается и в группе высокозарядных элементов (HFSE), которые обычно считаются устойчивыми к воздействию гидротермальных процессов.

Что касается REE, то они проявляют разные тенденции в низкотемпературной и в высокотемпературных зонах регионального метаморфизма. В первом случае происходит обогащение LREE и направленное снижение концентраций HREE, а в двух других, наоборот, проявляется прямо противоположный тренд в изменениях их содержания. Такие химические аномалии, как показывают эксперименты и природные примеры, могут быть связаны с активным взаимодействием флюида и породы при температурах более 350°C [14]. Кроме того, это, вероятно, также может быть связано с различиями температур окружающей сре-

**Рис. 5.** Нормированный по хондриту CI [11] график распределения REE в образцах триады (“Протолит–БКТ–ПСТ”) из трех точек опробования.

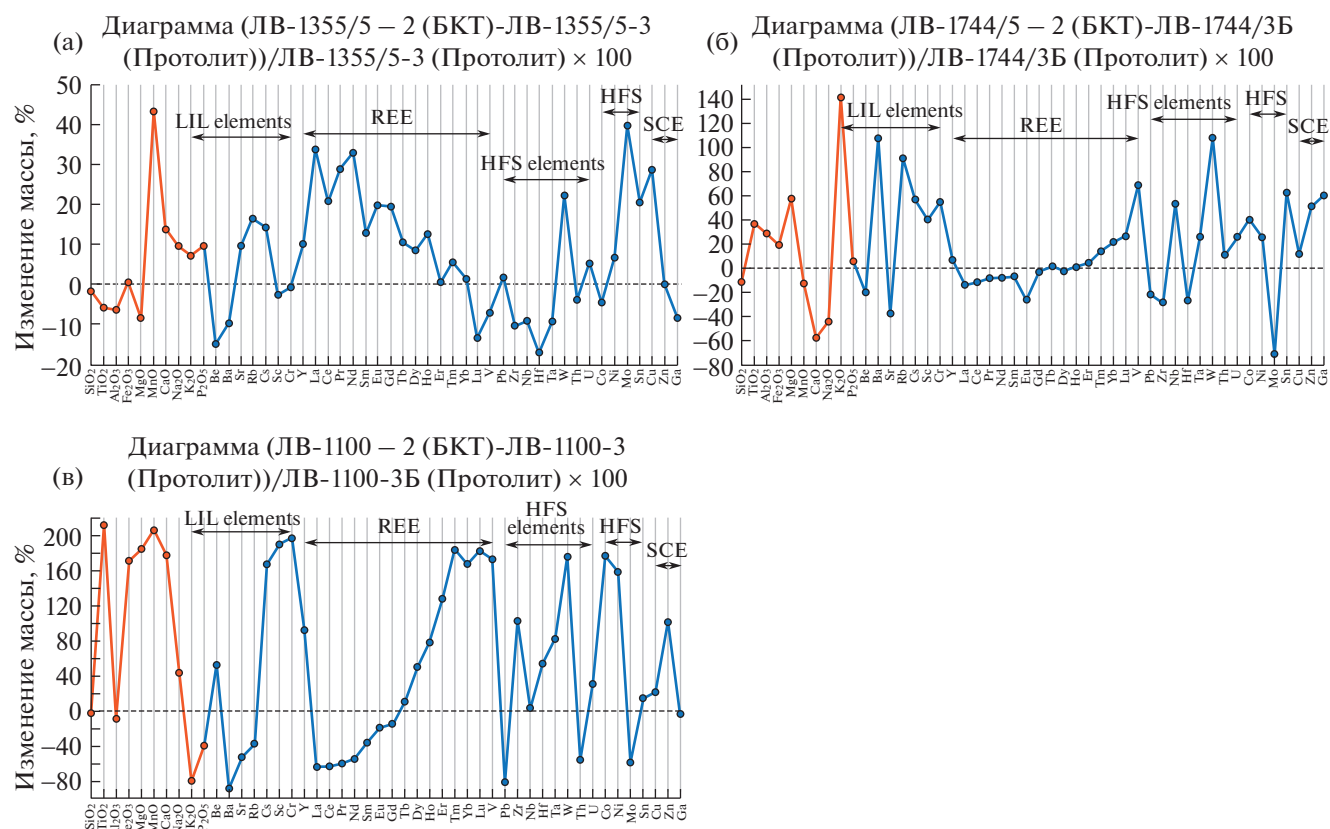


Рис. 6. Диаграммы изменений относительных содержаний элементов на стадии механического дробления в разломе (в паре “Протолит–БКТ”). А – ЛВ-1355; Б – ЛВ-1744; В – ЛВ-1100. Обозначение групп элементов: LIL – литофильные, LREE, HREE – легкие и тяжелые редкоземельные, HFS – высокочargedные, HSE – высокосидерофильные, SCE – сильно халькофильные.

ды в диапазоне 330–460°C, оцененных нами с помощью хлоритовой термометрии на тех уровнях глубинности, где происходили описываемые диафоритические преобразования в трех рассматриваемых точках опробования. Можно полагать, что мобилизационная активность элементов меняется в соответствии с изменением температурных условий.

Этап фрикционного плавления в парах “БКТ–ПСТ”. С учетом произошедших изменений элементного состава на этапе синорогенного диафореза (бластокатаклаза) метатерригенных пород ладожского комплекса, теперь можно оценить его изменчивость, связанную с перераспределением элементов при частичном фрикционном плавлении более позднего этапа коллапса растяжения орогена. Здесь следует отметить, что обусловленная этим процессом картина изменчивости элементного состава ПСТ может дополнительно осложняться от места к месту из-за весьма локализованного характера плавления в зоне подвижки в исходно неоднородном на микроуровне субстрате и из-за слабой перемешиваемости формирующихся расплавов в мультитадийном процессе фрикционного плавления [8].

Кроме того, сравнительный анализ составов расплавной матрицы на генерирующих поверхностях ПСТ и в участках нагнетания перемещенного расплава (рис. 7), выявляемые при этом различия в концентрациях редких и REE элементов, расширяют тот спектр факторов, которые влияют на их перераспределение в зоне сейсмогенной подвижки.

В зеленосланцевой зоне расплавная матрица около генерирующей поверхности (рис. 7 а), помимо уже упоминавшегося выше более чем двукратного обогащения калием, слегка обогащается Ba, Rb, Cs, но несколько обедняется Na, Ca, Be, Sr. Eu образует отчетливую отрицательную аномалию, по-видимому, наследуемую от метатерригенных пород протолита. Так как элементы первой группы обычно концентрируются в мусковите и биотите, а вторые преимущественно в плагиоклазах, то это убедительно свидетельствует о явном активном переходе в расплав слюдистых фаз и об ограниченном плавлении плагиоклазов. Несколько иная ситуация фиксируется в участках нагнетания расплава (рис. 7 б): начиная от литофильных элементов зарождается тренд повышения концентраций, распространяющийся и на

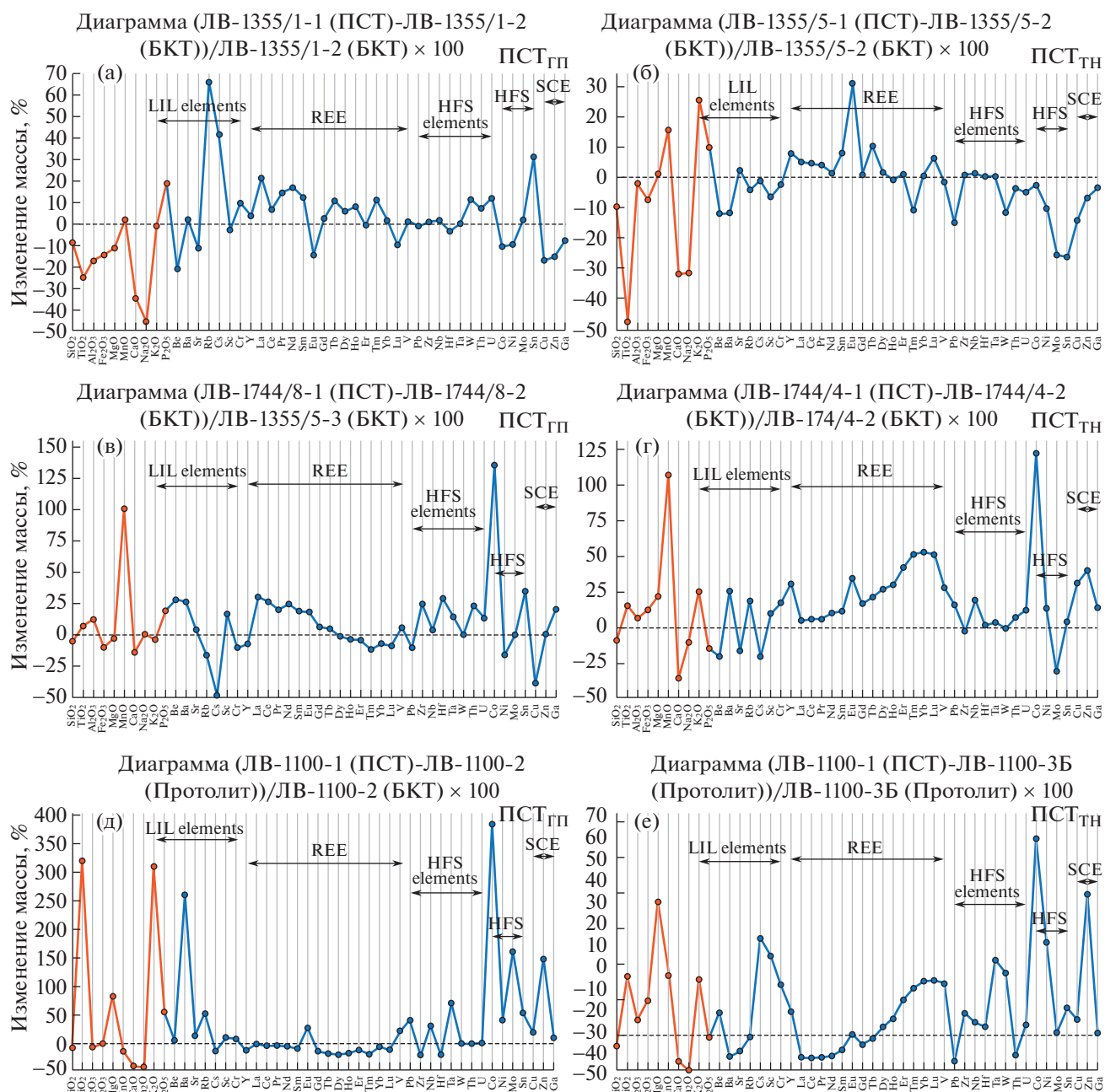


Рис. 7. Диаграммы изменений концентраций элементов при фрикционном плавлении в паре “БКТ–ПСТ”, на генерирующей поверхности (ПСТ_{ГП}) и в трещине нагнетания (ПСТ_{ТН}). а, б – LB-1355; в, г – LB-1744; д – LB-1100 (ПСТ/БКТ), е – LB-1100 (ПСТ/Гранит).

спектр LREE с пиком повышенной относительной концентрации Eu, после которой все содержания HREE неизменно падают. Последнее обстоятельство вполне согласуется с эмпирически установленной закономерностью снижения концентраций HREE при совместной магматической кристаллизации биотита и мусковита [13]. Отмеченная понижающая тенденция продолжается и далее в ряду высокочарядных элементов, завершаясь резким дефицитом элементов сидерофиль-

ной группы. Указанные особенности, вероятно, связаны с различающейся мобильностью в расплаве различных элементов.

В более высокотемпературных зонах также выявляются присущие им общие закономерности, а также некоторые различия в поведении элементов в полосах генерации ПСТ и в участках нагнетания расплава. Из общих тенденций в этих двух типах локализации ПСТ, в первую очередь обращают на себя внимание появление пика повы-

шенных относительных концентраций Eu, возрастание долей Cs, Sr, Y, а также весьма значительное накопление Co и халькофильных элементов. Заметны и характерные тренды в изменениях концентраций в общем ряду REE: в обеих зонах (силлиманит-мусковитовой и гранулитовой) около генерирующих поверхностей намечается слабое, но закономерное снижение содержаний от легких к тяжелым лантаноидам (рис. 7 в и д). В противоположность этому в трещинах нагнетания наблюдается ярко выраженная обратная направленность в их обогащении (рис. 7 г и е), что свойственно биотитам из метаминтрузивных пород, для которых характерно повышенное содержание Y и HREE (от середины ряда до Lu) при достаточно низких концентрациях Rb [13]. Вполне вероятно, что и обогащение европием, и повышение концентраций весьма мобильных халькофильных и сидерофильных элементов связаны уже с фиксируемыми на микроуровне наложенными на ПСТ процессами гидротермальной переработки субстрата восстановленными флюидами, по аналогии с описанными нами в Приладожье процессами поздних стадий свекофеннского тектогенеза [8].

Ввиду того, что нами были получены только валовые составы матрицы ПСТ, состоящей из раскристаллизованной и остаточной частей расплава, однозначная оценка разделения редких элементов и REE между ними затруднительна. Однако с учетом экспериментально установленного их фракционирования между биотитом и водонасыщенным гранитным расплавом [15] при параметрах плавления близких к установленным для ПСТ Приладожья [8], можно в предположительной форме затронуть аспект совместимого или несовместимого поведения некоторых из элементов применительно к данной ситуации фрикционного плавления. Исходя из экспериментально полученных коэффициентов распределения [15, Table 2] следует ожидать, что в структуру биотита в качестве совместимых элементов ($K_d > 1$) из литофильной группы могли войти Ba, Rb, а из высоkozарядных Nb и Ta. Nb в сравнении с Ta с большей легкостью встраивается в биотит, поэтому при частичном плавлении богатых биотитом пород возникают высокие Nb/Ta-отношения [16]. При этом можно полагать, что при раскристаллизации расплава и выпадении микролитов биотита, Nb больше сконцентрируется в нем, а Ta — в реститовом расплаве. Так как Nb и Ta имеют сродство с Ti, их высокие концентрации могут быть в Ti-содержащих минералах (ильменит, титанит и др.), зафиксированных нами в матрице ПСТ. Что касается REE, в слюдах наименее вероятны элементы центральной части их ряда (MREE) с минимальными значениями коэффициентов распределения (Gd, Tb и Dy), в то время как LREE и HREE, как менее несовмести-

мые, могут концентрироваться в биотите в позиции K (LREE) или в октаэдрической позиции Mg и Fe (HREE) [15]. К этому можно добавить, что раскристаллизованная микролитами биотита матрица ПСТ может также содержать целый ряд высоко совместимых, из-за весьма высоких коэффициентов распределения в системе биотит/расплав, переходных металлов, высокие концентрации которых зафиксированы в наших случаях (K_d — 17 для Ti, 35 для V, 47 для Co, 174 для Ni и 5.8 для Zn) [15].

В остаточном расплаве, местами кварцевого, местами плагиоклазового состава, скорее всего концентрировались несовместимые в слюдах элементы ($K_d < 1$) Sr, Ce, Cs, Eu. Последний мог быть локализован в участках остаточного плагиоклазового стекла, создав в большинстве случаев пики повышенных, относительно протолита, концентраций. Несовместимость этих элементов косвенно подтверждается их сопоставлением с Yb, как с одним из наиболее ярко выраженных несовместимых элементов в расплавах основного состава. Проявление положительной линейной корреляции с ним в разностях триады (рис. 8 а, б) может указывать на проявление несовместимых свойств указанных элементов в рассматриваемых породах.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Изложенные данные, помимо основной задачи фактологического наполнения геохимических аспектов преобразования породного вещества при фрикционном плавлении в разломной зоне, позволяют в той или иной степени осветить некоторые вопросы, поставленные в вводной части и касающиеся подвижности, перераспределения и фракционирования главных, редких и REE элементов при формировании сейсмогенных ПСТ по метатерригенным породам. Следует подчеркнуть, что процесс подготовки субстрата к плавлению и соответствующие изменения его элементного состава начинались еще на предшествующих стадиях формирования разломных бластокатаклазитов на этапе посттектонического орогенеза, когда вместе с механическим измельчением матрицы, сопровождавшимся ее гидротермальной проработкой, происходили заметные вариации содержаний тех или иных компонентов. При этом элементы разных групп (литофильные, REE, высоkozарядные и др.) проявляют разные тенденции в трех разнотемпературных зонах, связанные, скорее всего, с активным взаимодействием флюида и породы, а также с их различающейся мобильностью в зависимости от температуры окружающей среды.

Говоря об изменчивости составов и перераспределении элементов на стадии формирования

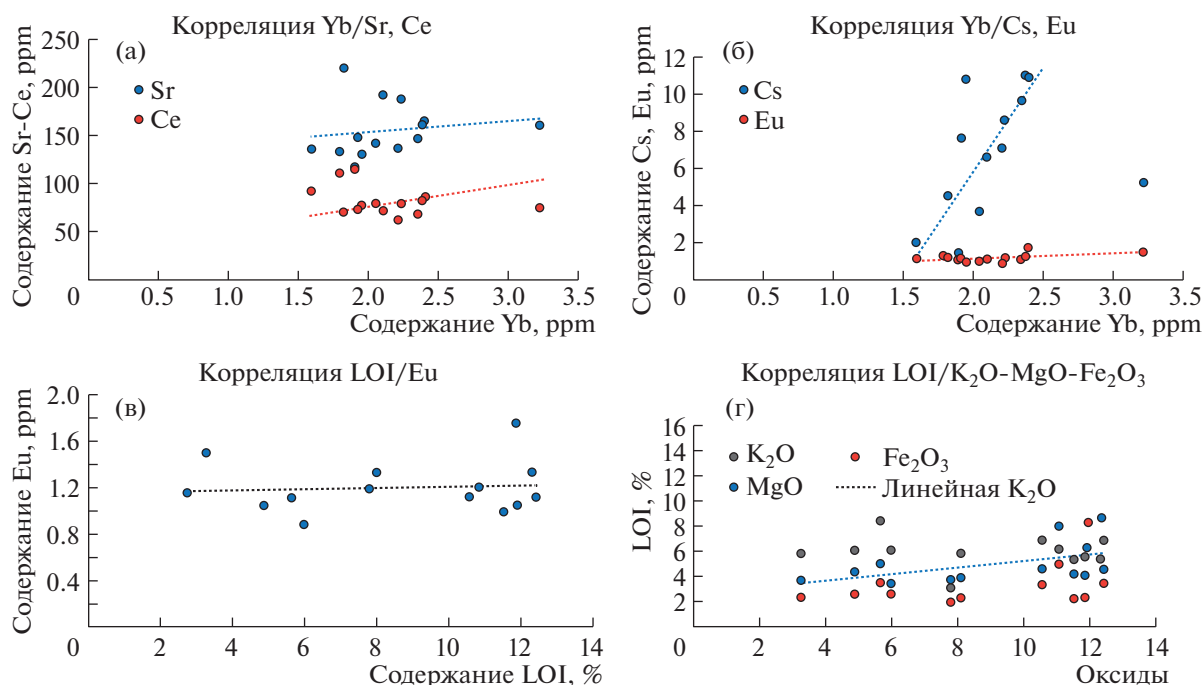


Рис. 8. Корреляция содержаний Sr-Ce (а), Cs-Eu (б) и иттербия; общих содержаний LOI/Eu (в) и LOI/K₂O + MgO + Fe₂O₃ (г) в разностях триады всех трех точек опробования.

ПСТ, прежде всего, следует отметить в качестве общей закономерности направленное увеличение основности при переходе протолита в расплав, а также его частичное и избирательное плавление в виде облегченного плавления слюд (биотита, мусковита) и слабой вовлеченности в этот процесс плагиоклаза и в наименьшей степени кварца. Это находит свое отражение в обогащении расплава в первую очередь теми главными, редкими и REE элементами, которые свойственны этим филлосиликатам, и в его обеднении соответствующими элементами тугоплавких фаз. Весомую лепту в проявление неравномерной концентрации элементов в матрице ПСТ вносит выявленная нами [8] направленная последовательность раскристаллизации расплава — сначала зарождаются микролейсты биотита, затем белых диоктаэдрических слюд, а остаточный расплав, местами плагиоклазового, местами кварцевого состава, в витрифицированном виде сосредотачивается в интерстициях между микролейстами. Каждая из этих фаз включает в себя свой набор и концентрацию элементов. Из наиболее очевидных закономерностей можно еще раз обратить внимание на смену поведения Eu при переходе от низкотемпературной зоны (отрицательная аномалия) к более высокотемпературным зонам с проявлением там пиков его относительных высоких содержаний. Его концентрация может быть связана с двумя факторами — переносом во флюиде, ассимилированном в расплаве (LOI), либо с воздействием на

расплавы восстановленных флюидов, поступающих в зону разлома при подвижке. Это имеет свое логичное объяснение. Благодаря способности европия легко создавать комплексные соединения с гидроксильными группами флюидов, а также сродству с железом и халькофильными элементами, его накопление в разломной зоне вполне отчетливо коррелируется с содержанием LOI в ПСТ (рис. 8 в) и с ростом концентраций этих, высоко подвижных во флюидной фазе, элементов (табл. 2). Говоря о роли флюидной компоненты, следует заметить, что одним из ее источников в разломных зонах, где формируются ПСТ, могут быть процессы дегидратации водосодержащих минералов, связанные с косейсмическим фрикционным разогревом. Высвободившиеся флюиды не только способствуют фрикционному плавлению (дегидратационное плавление), но, частично, поступают в расплав, привнося в него часть растворенных элементов, или вступают во взаимодействие с протолитом и, вероятно, с витрифицированным расплавом. В качестве примера можно привести факт линейной корреляции между содержанием LOI и K₂O, MgO, Fe₂O₃ (рис. 8 г), а также Rb, в расплаве ПСТ, что согласуется с высокой степенью вовлеченности носителя этих элементов — биотита, в плавление.

Еще одна значимая особенность связана с заметно различающимся характером накопления или выноса отдельных элементов в двух типах локализации ПСТ — вдоль генерирующих поверх-

ностей и в участках нагнетания расплава. Ярче всего в них выражено различие в трендах концентрации LREE и HREE (табл. 3): в первом типе локализации (ПСТ_{ГП}) в этом ряду проявлен понижающий тренд, а во втором (ПСТ_{ТН}) — обратная направленность в их обогащении (рис. 7 в–е). Дефицит легких REE может указывать на малую вовлеченность плагиоклаза в процесс частичного плавления, а повышение концентраций тяжелых вполне согласуется с предпочтительной кристаллизацией в расплаве биотита. Среди общих закономерностей можно также отметить весьма высокие отношения La/Lu во всех матрицах ПСТ по отношению к протолиту, что наиболее ярко выражено в зоне гранулитовой фации, свидетельствуя, по-видимому, о влиянии температуры окружающей среды на степень дифференцированности расплава. Наконец, с учетом полученных нами оценок температур солидуса и ликвидуса ПСТ-расплавов [8], можно констатировать, что все выявленные особенности и закономерности поведения главных, редких и REE элементов при фрикционном плавлении в зонах сейсмогенных подвижек соответствуют ситуации частично, избирательного плавления и контролируются низшими точками плавления отдельных породообразующих минералов.

В заключение следует подчеркнуть, что представленные данные по перераспределению элементов в ходе фрикционного плавления затрагивали преимущественно основные породообразующие минералы рассмотренных метатерригенных пород (слюды, плагиоклазы, калиевые полевые шпаты, кварц). Однако существенный вклад в этот процесс перераспределения, несомненно, вносили и акцессорные фазы (апатит, монацит, ильменит, сфен, циркон и др.) — концентраторы многих микроэлементов и REE. Оценка роли этих вспомогательных фаз в рассматриваемых процессах формирования составов ПСТ — отдельная и пока еще слабо изученная проблема, требующая специальных исследований. Наши предварительные результаты свидетельствуют о возможном разном влиянии отдельных фаз, вовлеченных в плавление, на изменение концентраций LREE и HREE. Так, в образцах из зоны зеленосланцевого метаморфизма (ЛВ-1355) во вмещающем субстрате среди акцессориев отчетливо доминирует апатит, который в матрице ПСТ практически не встречается, что свидетельствует о его переходе в расплав. Как раз это может быть причиной отмеченного нами возрастания концентраций HREE, носителем которых он считается [17]. Дальнейшие аналитические исследования в этом направлении позволят оценить вклад и других акцессориев в перераспределение микроэлементов и REE при формировании ПСТ в разных метаморфических зонах Приладожья, с учетом соответствующих изменений составов породообразующих минераль-

ных фаз, а также температур окружающего субстрата во время формирования ПСТ.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках исследований по Гранту РНФ № 27-22-000445.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаковский А.Л., Морозов Ю.А., Смольская А.И. Тектонический стресс как дополнительный термодинамический фактор метаморфизма // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 1. С. 44–68.
2. Морозов Ю.А., Смольская А.И., Кулаковский А.Л., Матвеев М.А. Структурно-вещественные записи палеоземлетрясений в терригенных породах: анализ и интерпретация // Физика Земли. 2018. № 1. С. 3–25.
3. Spray J.G. Artificial generation of pseudotachylite using friction welding apparatus: simulation of melting on a fault plane // Journal of Structural Geology. 1987. V. 9. № 1. P. 49–60.
4. Di Toro G., Hirose T., Nielsen S., Shimamoto T. Relating High-Velocity Rock-Friction Experiments to Coseismic Slip in the Presence of Melts / Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting. Eds Abercrombie R. et al. Geophys. Monogr. Ser. 2006. V. 170. P. 121–134. AGU, Washington, D. C.
5. Морозов Ю.А., Смольская А.И., Матвеев М.А., Кулаковский А.Л. Псевдотачилиты: два генетических типа // ДАН. 2019. Т. 484. № 5. С. 589–594.
6. Морозов Ю.А., Юдин Д.С., Травин А.В., Смольская А.И., Кулаковский А.Л., Матвеев М.А. Первые находки и ⁴⁰Ar/³⁹Ar-датирование псевдотачилитов в палеопротерозойском зонально метаморфизованном ладожском комплексе Фенноскандии // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 5–9.
7. Морозов Ю.А., Терехов Е.Н., Матвеев М.А., Окينا О.И. Геохимические метки совместной структурно-вещественной эволюции чехла и фундамента (свекофениды Северного Приладожья, Россия) // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. Вып. 3. Статья 0636.
8. Матвеев М.А., Смольская А.И., Морозов Ю.А. Особенности фрикционного плавления пород и кристаллизации расплава в ходе сейсмического процесса (на примере псевдотачилитов Приладожья) // Физика Земли. 2022. № 6. С. 134–161.
9. De la Roche H., Leterrier J., Grandclaude P., Marchal M. A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks Using R1-R2 Diagrams and Major Element Analyses — Its Relationships with Current Nomenclature // Chemical Geology. 1980. V. 29. P. 183–210.
10. Batchelor R.A., Bowden P. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters // Chemical Geology. 1985. V. 48. P. 43–55.
11. McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120 (3–4). P. 223–253.

12. Nakamura Y., Toyoshima T., Satish-Kumar M. Microstructure and geochemical signatures of metasedimentary origin pseudotachylyte: Implications for fluid activity during paleoseismicity // *Tectonophysics*. 2018. V. 745. P. 170–182.
13. Samadi R., Torabi G., Kawabata H., Miller N.R. Biotite as a petrogenetic discriminator: Chemical insights from igneous, meta-igneous and meta-sedimentary rocks in Iran // *Lithos*. 2021. V. 386–387. 106016.
14. Hamada Y., Hirono T., Ishikawa T. Coseismic frictional heating and fluid-rock interaction in a slip zone within a shallow accretionary prism and implications for earthquake slip behavior // *Journal of Geophysical Research*. 2011. V. 116. B01302.
15. Were P., Keppler H. Trace element fractionation between biotite, allanite, and granitic melt // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. V. 176. Iss. 9. Art. 74.
16. Stepanov A., Hermann J. Fractionation of Nb and Ta by biotite and phengite: Implications for the “missing Nb paradox” // *Geology*. 2013. V. 41. P. 303–306.
17. Zeng L., Asimov P.D., Saleeby J.B. Coupling of anatectic reactions and dissolution of accessory phases and the Sr and Nd isotope systematics of anatectic melts from a metasedimentary source // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2005. V. 69. № 14. P. 3671–3682.

GEOCHEMICAL ASPECTS OF METAPSAMMIT FRICTIONAL MELTING DURING SEISMIC MOVEMENTS (BY THE EXAMPLE OF PSEUDOTACHYLYTES OF THE LADOGA REGION)

Corresponding Member of the RAS Yu. A. Morozov^{a, #}, M. A. Matveev^a, S. G. Skublov^{b, c},
A. I. Smulskaya^a, E. N. Terekhov^d, and A. S. Larkov^a

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

^b*Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation*

^c*Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation*

^d*Geological Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: frost@ifz.ru*

Based on geochemical analyses of tectonic pseudotachylytes and their host rocks the features of redistribution of major, rare and rare-earth elements during seismogenic frictional melting of arkose-type metaterigenous rocks from different-temperature zones of regional metamorphism) of Northern Ladoga region are considered. Multidirectional trends in variations of the major elements oxides contents in the triad protolith-blastocataclasite-pseudotachylyte were revealed, but a unidirectional increase of the frictional melt basicity in comparison with the protolith was established. Geochemical evidence of partial selective melting of source rocks is considered. Peculiarities of rare and rare-earth elements fractionation during transition to the melt of protolithic material, as well as during its subsequent partial crystallization are shown. The appearance of positive europium anomaly in the melt matrix of all three sampling points is noted. By changes of these elements' concentrations in zones of pseudotachylyte substrate generation and in areas of its injection their differential mobility during frictional melting in a zone of dynamic movement is estimated.

Keywords: pseudotachylytes, blastocatlazites, frictional melting, seismic movement, geochemistry, major, rare, rare-earth elements