

УДК 550.93:551(571.5)

ГЕОХИМИЯ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ПСЕВДОТАХИЛИТОВ АНАБАРСКОГО ЩИТА И МЕХАНИЗМ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

© 2010 г. М. З. Глуховский, академик М. И. Кузьмин

Поступило 05.11.2009 г.

Настоящее исследование направлено на решение вопроса об условиях формирования мощных тел палеопротерозойских псевдотахилитов Анабарского щита путем изучения особенностей их геохимии, а также геохимии материнских пород.

Псевдотахилиты – породы, формирование которых происходит в условиях амфиболитовой фации за счет быстрого трения (перетиранья) и плавления стенок трещин в породах верхней коры во время землетрясений и крупных импактных событий.

Исследованы псевдотахилиты Анабарского щита, развитые на периферии крупной (диаметр 250 км) Котуйканской кольцевой структуры (рис. 1). Они представлены как маломощными жилами и прожилками (тип А), так и мощными протяженными телами (тип В). Формирование псевдотахилитов связано с импактным событием, которое произошло 1900 ± 50 млн. лет назад и сопровождалось фрикционным плавлением стенок трещин при шоковом сжатии и сдвигах. Их выплавление происходило из архейского корового протолита (модельный возраст псевдотахилитов $T_{DM} = 3031$ и 3099 млн. лет, $\epsilon_{Nd} = -9.6...-11.79$) [1].

Как показал Х. Мелощ [2], главная тайна механизма образования значительных по объему масс псевдотахилитов, отнесенных к типу В, заключается в том, что начальный процесс формирования псевдотахилитов, слагающих тонкие прожилки (тип А), должен препятствовать появлению большого количества расплава из-за уменьшения трения между скользящими блоками пород. Разгадка этой тайны связывается с особенностями формирования крупного ударного кратера, поскольку экструзивные мощные жилы и дайки псевдотахилитов развиваются в кольцах вокруг таких впадин. Это видно на примере импактной структуры Садбери (Sudbery) [3] и подтверждается положением мощных тел псевдотахилитов на периферии

Котуйканской импактной структуры (рис. 1). Предполагается, что под воздействием ударной волны и сильной вибрации на краях кратера (за счет дефицита масс внутри его) по зонам скалывания в узких зонах сдвигов появляется начальный расплав (тип А). Обладая низкой вязкостью, он в условиях резкого уменьшения прочности пород вытесняется из плоскости скольжения в смежные открытые трещины и карманы. В результате этого скользящие поверхности стенок трещин, вибрируя, постоянно находятся в тесном соприкосновении, продуцируя все новые порции расплава. Таким образом, при формировании псевдотахилитов типа В фрикционному плавлению

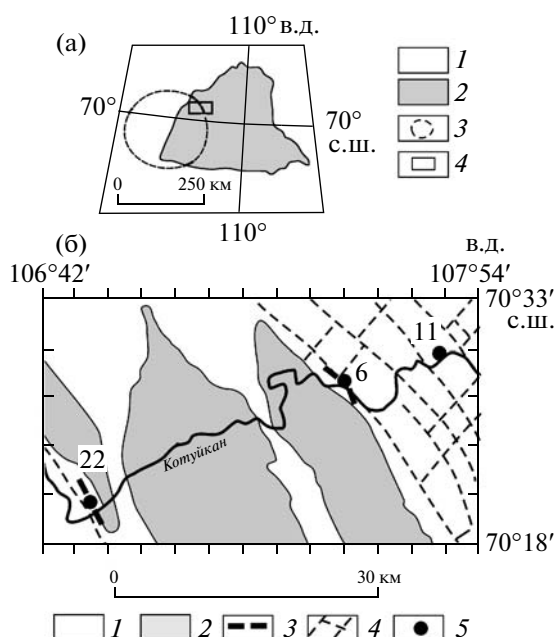


Рис. 1. Обзорная схема района Котуйканской кольцевой структуры (а) и участок исследований (б). а: 1 – чехол Сибирской платформы; 2 – Анабарский щит; 3 – Котуйканская кольцевая структура; 4 – контур участка исследований. б: 1 – нерасчлененные метаморфические образования архея Анабарского щита; 2 – анортозиты палеопротерозоя; 3 – тела псевдотахилитов в прослеженных границах; 4 – разломы и трещины; 5 – места отбора проб и их номера.

Геологический институт
Российской Академии наук, Москва
Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск

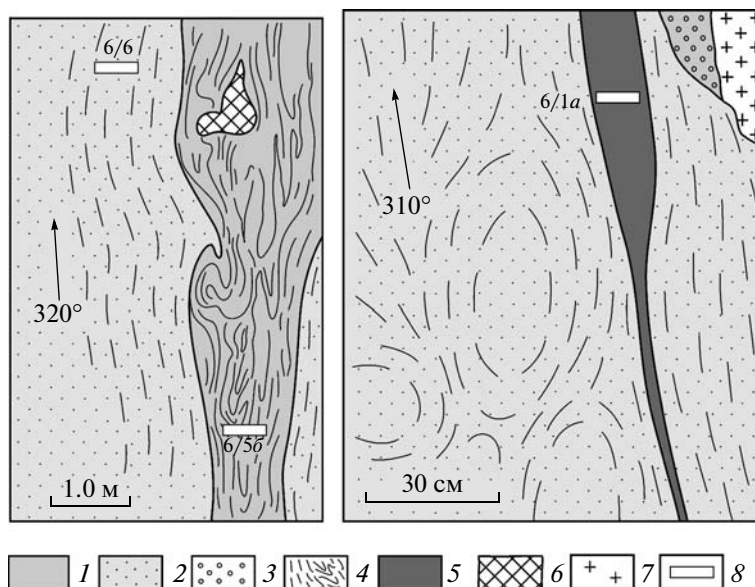


Рис. 2. Зарисовка фрагментов обнажения псевдотрахилитов № 6 с указанием мест отбора проб. 1 — псевдотрахилиты массивные антрацито-черные; 2 — псевдотрахилиты с раскристаллизованным стеклом (микрзернистые амфиболиты); 3, 4 — текстурно-структурные особенности псевдотрахилитов: 3 — с округлыми включениями минералов, 4 — с шаровой отдельностью, со следами сублинейных и пластических сдвигов; 5 — мелко-среднекристаллические реститовые амфиболиты; 6 — пироксеновый кристаллический сланец; 7 — граниты; 8 — места отбора проб и их номера.

нию подвергались не только ранее не затронутые этим процессом “свежие” материнские породы, но и предшествующие вытесненные порции расплава. Такой механизм их образования отвечает теоретически и экспериментально доказанному процессу зонной плавки [4] или частичного плавления.

Разные механизмы образования псевдотрахилитов типов А и В отразились в их составах. Так, на Анабарском щите состав тонких жил и прожилков псевдотрахилитов типа А, образующихся в результате быстрого и одноактного плавления, в целом подобен составу вмещающих пород. Эти псевдотрахилиты по сравнению с боковыми породами незначительно обогащены фемическими элементами и кальцием, обеднены кремнеземом и натрием [5]. Если верна модель [2], то геохимия псевдотрахилитов типа В должна отличаться от материнских пород, за счет неоднократного частичного плавления которых они произошли. Становится очевидным, что для проверки этой версии необходимо провести сравнение состава и содержания редких элементов в парагенетической триаде: исходные (материнские) породы—продукты плавления (псевдотрахилиты)—реститы.

Геохимия этих пород рассматривается на примере обнажений псевдотрахилитов № 6 и 22, которые служили объектами геохронологических исследований [1], также ближайшего к ним обнажения архейских метабазитов № 11 (см. рис. 1), кроме того, они сравниваются со средним составом архейской коры [6] (табл. 1).

Обнажение № 6 расположено вблизи внешнего контакта Восточного массива анортозитов на левобережье р. Котуйкан в районе устья ее притока — р. Левый Киристин-Юрэх (рис. 1). Здесь в полосе шириной около 400 м вскрываются узкие (до первых метров) протяженные линзы антрацито-черных афанитовых пород, местами содержащие округлые включения полевого шпата (рис. 2). Они перемежаются с многометровыми полосами мелко- и микрокристаллических меланократовых пород (микроамфиболитов), похожих на роговик или диабаз (типичный вид девитрифицированных псевдотрахилитов [7]). На выветрелой поверхности афанитовых пород (с включением обломка пироксен-плаггиоклазового кристаллического сланца) в полосе шириной от 0.7 до 2–3 м и протяженностью более 7 м видны следы продольного сдвигового пластического течения. Микроамфиболиты тоже обнаруживают внешние признаки пластического течения материала. Среди них иногда встречаются овоидные формы размером до 0.5×0.3 м, напоминающие шаровую отдельность, и линейные структуры. Различие структурных форм может свидетельствовать о многократном процессе внедрения расплавленной массы, кристаллизующейся в разных тектонических условиях (сжатие со сдвигом и растяжение). Кроме этого, здесь обособляется относительно маломощное удлиненное тело мелко-среднезернистых амфиболитов. К востоку, вверх по течению р. Котуйкан, псевдотрахилиты обнажения № 6 постепенно, через полосу инъекционных гнейсов, сме-

Таблица 1. Содержание петрогенных (%), редких и редкоземельных элементов (г/т)

Компонент	ан-11	АК	ан-6/5б	ан-6/6	ан-22/4а	ан-6/1а
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	47.97	57.0	56.01	58.12	62.60	46.74
TiO ₂	1.38	1.0	1.03	0.67	0.66	1.20
Al ₂ O ₃	14.58	15.2	13.89	15.05	15.50	13.82
FeO	8.05	9.6*	Не опр.	Не опр.	4.31	Не опр.
Fe ₂ O ₃	4.10	Не опр.	9.61*	6.14*	1.61	14.41*
MnO	0.19	»	0.13	0.08	0.09	0.23
MgO	6.35	5.9	4.94	3.84	3.00	7.71
CaO	10.82	7.2	5.99	5.01	4.70	9.96
Na ₂ O	2.51	3.0	3.11	3.87	3.78	2.67
K ₂ O	0.93	0.9	2.43	3.68	2.57	1.36
P ₂ O ₅	0.09	Не опр.	0.24	0.49	0.20	0.06
П.п.п.	0.71	»	2.34	2.78	1.14	1.83
Сумма	99.18	99.9	99.72	99.73	100.16	100.01
Be	Не опр.	Не опр.	1.26	1.29	1.25	1.24
Sc	25	14	22.77	11.65	10.63	44.48
V	334	195	199.03	112.11	86.31	327.28
Cr	94	180	132.01	107.65	62.42	206.39
Co	53	25	28.55	19.45	14.16	43.14
Ni	95	103	65.63	55.33	33.50	99.37
Cu	70	80	72.17	57.96	37.27	73.04
Zn	60	Не опр.	117.21	84.49	72.38	159.07
Ga	25	»	19.73	20.31	19.02	19.11
Ge	11	»	1.16	1.07	0.90	1.44
Rb	7	28	67.23	61.42	40.96	27.54
Sr	350	215	570.73	1076.51	319.85	299.37
Y	22	19	19.39	17.28	21.52	23.53
Zr	86	100	133.92	199.37	222.36	41.44
Nb	15	Не опр.	6.72	5.57	9.25	5.34
Mo	8	»	2.12	0.30	0.66	0.68
Sn	Не опр.	»	1.73	1.42	1.45	2.41
Sb	»	»	0.05	0.10	0.07	0.04
Cs	»	»	0.56	0.38	0.56	0.08
Ba	140	220	1200.77	2062.99	1062.09	174.73
La	16	15	47.13	77.20	60.93	10.84
Ce	38	31	98.57	168.78	141.33	28.26
Pr	4.7	3.7	10.64	17.94	12.41	3.85
Nd	20	16	40.08	65.16	44.90	17.27
Sm	5.1	3.4	7.35	11.28	8.00	4.43
Eu	1.69	1.1	2.17	2.92	1.63	1.66
Gd	5.17	3.2	6.32	8.85	7.53	5.54
Tb	Не опр.	0.59	0.83	0.90	0.97	0.84
Dy	4.95	3.6	4.66	4.31	5.45	5.44
Ho	0.89	0.77	0.91	0.78	1.06	1.13
Er	2.67	2.2	2.46	1.82	2.65	3.16
Tm	Не опр.	0.32	0.35	0.26	0.35	0.47
Yb	2.65	2.2	2.23	1.58	2.06	2.97
Lu	0.30	0.33	0.29	0.23	0.25	0.48
Hf	2.5	Не опр.	3.84	5.36	6.53	1.54
Ta	0.5	»	0.44	0.28	0.41	0.33
W	Не опр.	»	0.39	0.19	0.37	1.37
Tl	»	»	0.34	0.42	0.41	0.13
Pb	8	»	14.82	22.25	15.50	8.50
Th	1.5	2.9	10.33	16.15	28.41	0.63
U	0.2	1.5	0.88	0.65	1.21	0.28

Примечание. 1 – пироксеновый кристаллический сланец; 2 – средний состав архейской коры (АК) [6]; 3–5 – псевдотахилиты; 6 – реститовый амфиболит. Звездочкой отмечено общее содержание железа.

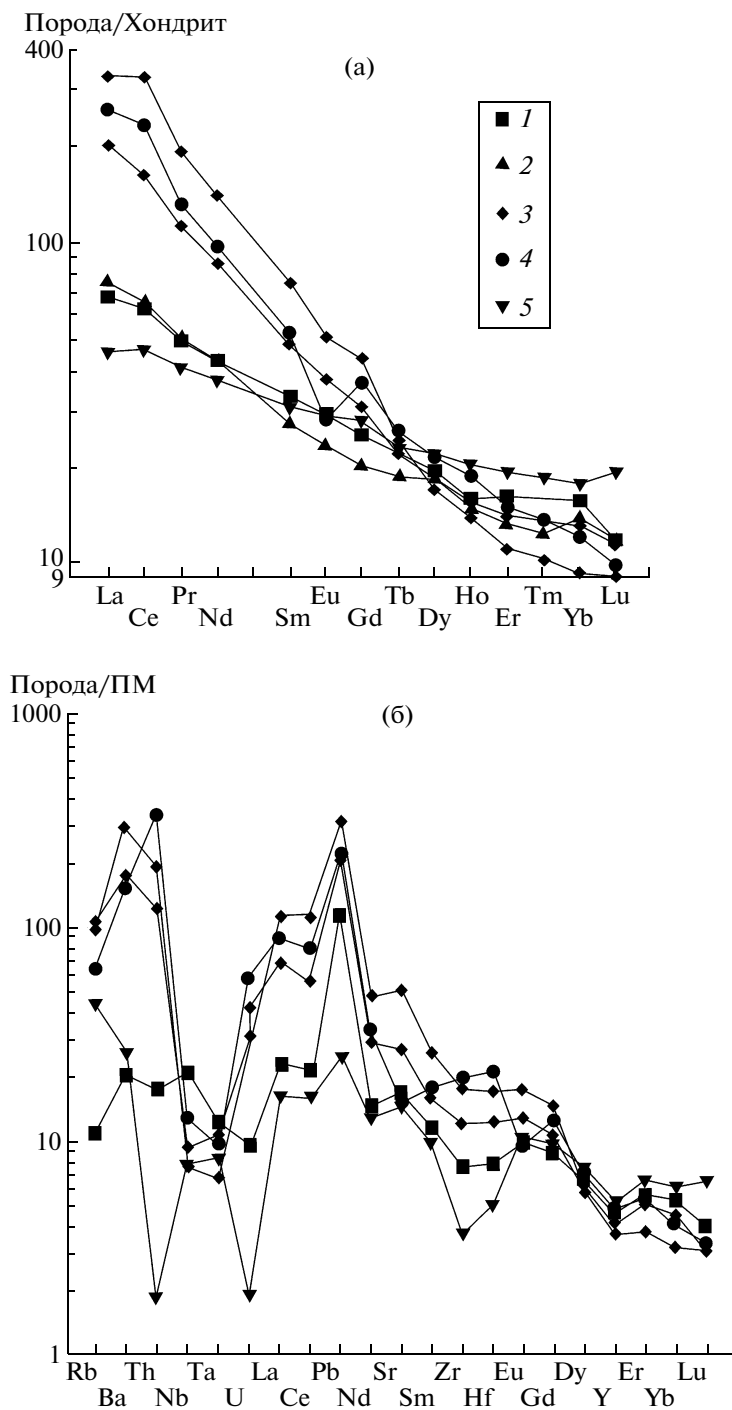


Рис. 3. Нормированное по хондриту распределение редкоземельных элементов в рассматриваемом петрогенетическом ряду (а) и спайдердиаграмма для этих же пород (б). 1 – метабазиты, проба ан-11; 2 – средний состав верхней архейской коры по [6]; 3, 4 – псевдотахилиты, пробы ан-6/6, ан-6/5б (3) и ан-22/4а (4); 5 – реститовый амфиболит, проба ан-6/1а. ПМ – примитивная мантия.

няются палеопротерозойскими порфиروبластическими биотитовыми гранитами. Отдельные жилы таких гранитов отмечаются и внутри тела псевдотахилитов, обнаруживая наибольшую концентрацию в зоне контакта с анортозитами.

Второе тело псевдотахилитов шириной 200–250 м и прослеженной протяженностью более 1 км расположено ниже по течению на правобережье р. Котуйкан (рис. 1, обнажение № 22). В месте его изучения оно сложено однородными

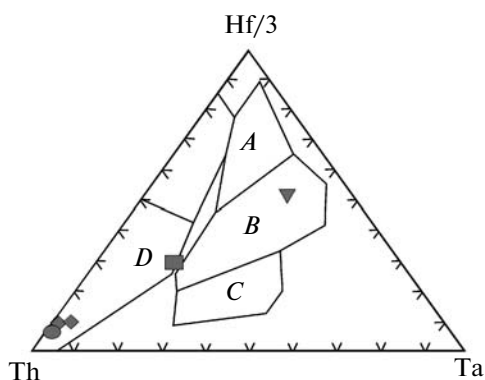


Рис. 4. Дискриминационная диаграмма Th–Hf–Ta [10] в применении к породам Анабарского щита рассматриваемого петрогенетического ряда; обозначения как на рис. 3. Поля на диаграмме: *A* – N-тип MORB, *B* – E-тип MORB, *C* – внутриплитные щелочные базальты, *D* – базальты островных дуг; линия в поле *D* разделяет толеиты островных дуг и известково-щелочные базальты.

плотными антрацитом-черными афанитовыми породами с округлыми (до 1–2 см) включениями полевого шпата и имеет резкие контакты с древней зоной бластомилонитов с реликтами метабазитов, эндербитов и супракрустальных образований с одной стороны и с анортозитами Западного массива – с другой.

При выборе материнских пород использованы два варианта составов. В первом взяты неизмененные меланократовые пироксен-плагиоклазовые кристаллические сланцы, подобные тем, которые встречаются в виде включения в псевдотахилитах обнажения № 6 и которые можно рассматривать как фрагмент субстрата. Такие породы вскрываются в скальном обнажении № 11, расположенном в береговом обрыве р. Котуйкан, в 6–8 км выше по течению (рис. 1). Во втором случае, полагая, что материнской породой может оказаться материал гетерогенной архейской континентальной коры, взят ее общий состав [6].

Третий член парагенетической триады – рестит – выделен на основе особенностей его состава (табл. 1). Он представлен плотными средне-мелкозернистыми амфиболитами из обнажения № 6. Предполагается, что эти породы были тектонически перемещены к поверхности вместе с псевдотахилитовым расплавом.

Аналитические исследования выполнены в лаборатории Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (аналитик Н.Н. Пахомова). Элементный анализ пород методом ISP-MS осуществляли на приборе “Element-2” путем автоклавного разложения при низком, среднем и высоком разрешении с применением стандартов СДУ (дунит) и ССн 1 (сыннырит).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что псевдотахилиты по петрохимии отвечают андезитам. Они в сравнении с обоими типами материнских пород обогащены кремнеземом, щелочными и щелочноземельными элементами, имеют низкие содержания Ti, Fe, Mg и Ca при относительно равном количестве Al_2O_3 . Амфиболиты, которые рассматриваются в качестве рестита (обр. ан-6/1а), характеризуются относительно более высокими содержаниями Fe, Mg, Cr, Co, Ni и пониженными количествами SiO_2 и щелочей. Как видно, в целом все это сопоставимо с распределением главных и малых элементов по легкоплавким и реститовым фазам, которые образуются при зонной плавке метеоритов [4].

Распределение редкоземельных элементов в рассматриваемой петрогенетической триаде говорит о быстрой и низкой степени частичного плавления исходной породы, когда расплав по сравнению с ней заметно обогащается легкими редкоземельными элементами (РЗЭ), при незначительном обеднении тяжелыми. Содержания РЗЭ в выплавке комплементарно их количеству в рестите (рис. 3). На спайдердиаграмме видно, что псевдотахилиты по сравнению с материнскими породами и реститом характеризуются положительными аномалиями Ba, Th и Pb и отрицательными – Nb и Ta, что типично для средней континентальной коры [8] и для пород известково-щелочной серии активных континентальных окраин [9]. Это отражено и на дискриминационной диаграмме Th–Hf–Ta (рис. 4), разработанной для базальтов, а также пород среднего и кислого составов [10].

Таким образом, геохимия пород всего рассмотренного петрогенетического ряда в сочетании со структурными и изотопно-геохронологическими данными [1] позволяет сделать следующие выводы.

1. Псевдотахилиты, слагающие мощные тела, характеризуются высокими содержаниями (положительными аномалиями) Ba, Th, Pb и отрицательными аномалиями Nb и Ta. Такие геохимические особенности, включая спектр распределения РЗЭ, свойственны фанерозойским породам из систем островных дуг или активных континентальных окраин, образующихся в зонах субдукции в условиях сжатия. Очевидно, что и геохимические характеристики палеопротерозойских псевдотахилитов определяются особенностями их генезиса. Они образовались в результате частичного плавления архейской коры также в условиях сжатия, но в специфической обстановке импактного события. Следовательно, решение вопроса о геодинамической природе пород определенного геохимического типа следует принимать с учетом анализа всех структурно-геологических, тектонических, морфологических и других факторов.

2. Большая мощность тел псевдотахилитов и их структурная неоднородность свидетельствуют о неоднократной быстрой смене режимов сжатия и растяжения или вибрации. Как отмечено выше, при сжатии и сдвигах происходило фрикционное плавление субстрата, а при растяжении – раскрытие трещин и внедрение все новых порций расплава. Быстрота этих знакопеременных движений отражена в близких значениях времени закрытия Sm–Nd- и Rb–Sr-изотопных систем в интервале 1900 ± 50 млн. лет, отвечающих соответственно возрасту генерации расплавов и завершающего метаморфизма, протекавшего в условиях давления и температур амфиболитовой фации и приведшего к раскристаллизации стекла и превращению всей массы псевдотахилитов в милолистиниты [1]. Такой специфический вибрационный геодинамический режим механизма образования мощных тел псевдотахилитов [2], очевидно, свойствен масштабным импактным событиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глуховский М.З., Кузьмин М.И., Баженова Г.Н. и др. // ДАН. 2009. Т. 425. № 4. С. 513–518.
2. Melosh H.J. The Mechanics of Pseudotachylite Formation in Impact Events. Submitted to the Proceedings of the June 2002 Mora, Sweden Impact Conf. 28 April 2003. <http://www.Ipl.arizona.edu/~imelosh/pseudotachylites.pdf>. 30 p.
3. Sprey J.G. // Geology. 1995. № 23. P. 1119–1122.
4. Виноградов А.П. // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1962. № 11. С. 3–17.
5. Лутц Б.Г. // Геология и геофизика. 1962. № 11. С. 98–102.
6. Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.
7. Шорт Н.М. В кн.: Взрывные кратеры на Земле и планетах. М.: Мир, 1968. С. 30–67.
8. Hofmann A.W. // Nature. 1997. V. 385. P. 219–229.
9. Pearce J.A. In: Continental Basalts and Mantle Xenoliths. Nantwich: Shiva Press, 1983. P. 230–249.
10. Wood D.A. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1980. V. 50. P. 325–343.