

УДК 550.93:551(571.5)

Sm–Nd- и Rb–Sr-ВОЗРАСТ И ВОЗМОЖНАЯ ПРИРОДА ПСЕВДОТАХИЛИТОВ АНАБАРСКОГО ЩИТА

© 2009 г. М. З. Глуховский, академик М. И. Кузьмин, Г. Н. Баженова, Т. Б. Баянова, Д. В. Елизаров, П. А. Серов

Поступило 22.10.2008 г.

Цель работы – определение возраста и условий образования мощных тел псевдотахилитов Анабарского щита путем использования данных геологических, петрогеохимических и изотопно-геохронологических исследований, а также результатов геологического дешифрирования космических снимков и интерпретации геофизических полей.

Псевдотахилиты – породы, формирование которых происходит в условиях амфиболитовой фации за счет быстрого трения (перетирания) и плавления стенок трещин в породах верхней коры при сдвиговых дислокациях во время землетрясений и крупных импактных событий [1–3]. Выделяют два морфологических типа псевдотахилитов [3]: тип А – маломощные (от миллиметров до первых метров) жилородные тела и тип В – мощные (до 500 м) и протяженные тела со сложным внутренним строением. Как правило, псевдотахилиты сложены черным бесструктурным непрозрачным стекловидным (афанитовым) веществом, составляющим их основную массу. В эту массу часто включены многочисленные обломки пород и минералов размером от миллиметров до 1–2 см. Вместе с тем часто встречаются и другие петрографические разновидности псевдотахилитов. Они, имея внешнее сходство с первыми, отличаются от них микрозернистым пылевидным строением основной массы за счет ее раскристаллизации. Это по существу апопсевдотахилиты или милолистиниты [4]. Было установлено, что образование псевдотахилитов на Анабарском

щите осуществлялось за счет переплавления метаморфических пород разного состава (от metabазитов до эндербитов) вблизи узких зон катаклаза и милонитизации. Оно сопровождалось выплавлением ортоклаз-альбит-кварцевой эвтектики, которая под большим давлением выносилась в межзерновое пространство и по трещинам. Оставшийся материал псевдотахилитов обогащался фермическими элементами и кальцием, с уменьшением кремнезема, натрия и незначительно глинозема, отличающегося малой подвижностью [5].

Псевдотахилиты Анабарского щита развиты на периферии крупной (диаметр 250 км) Котуйканской кольцевой структуры, дешифрируемой на космических снимках низкого и среднего разрешения. Один ее сегмент захватывает западную часть Анабарского щита, а другой – примыкающую к нему область платформы (рис. 1), где на черно-белых снимках эта структура выделяется в виде темного (на цветных снимках зеленого) ареала листовенничной тайги на более светлом фоне окружающей лесотундры. Причина этого будет рассмотрена в заключении статьи. Кольцевая структура характеризуется конформной зональностью магнитных аномалий, особенно в ее центре, где выделяется также изометричная (диаметром 80 км) аномалия избыточной плотности на общем фоне с дефицитом плотности (в редукции Буге).

В пределах кольцевой структуры выделяются два вытянутых купола, ограниченных разломами (см. рис. 1). Один из них – Котуйканский (80 × 40 км), а второй – Маганский (60 × 30 км). В пределах первого купола локализованы три сближенных массива анортозитов: Западный, Центральный и Восточный. В границах второго купола анортозиты слагают относительно небольшие тела. На космических снимках видно, что оба купола, в сравнении с окружающей рамой, слабо затронуты трещинной тектоникой. За их пределами кристаллический фундамент расколот на ортогональные, иерархически соподчиненные, тектонические блоки или куски (по [6]), ограниченные дуговыми и радиальными разломами Котуйканской кольцевой структуры. Наиболее крупные

Геологический институт
Российской Академии наук, Москва
Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской Академии наук, Москва
Геологический институт
Кольского научного центра
Российской Академии наук,
Апатиты Мурманской обл.

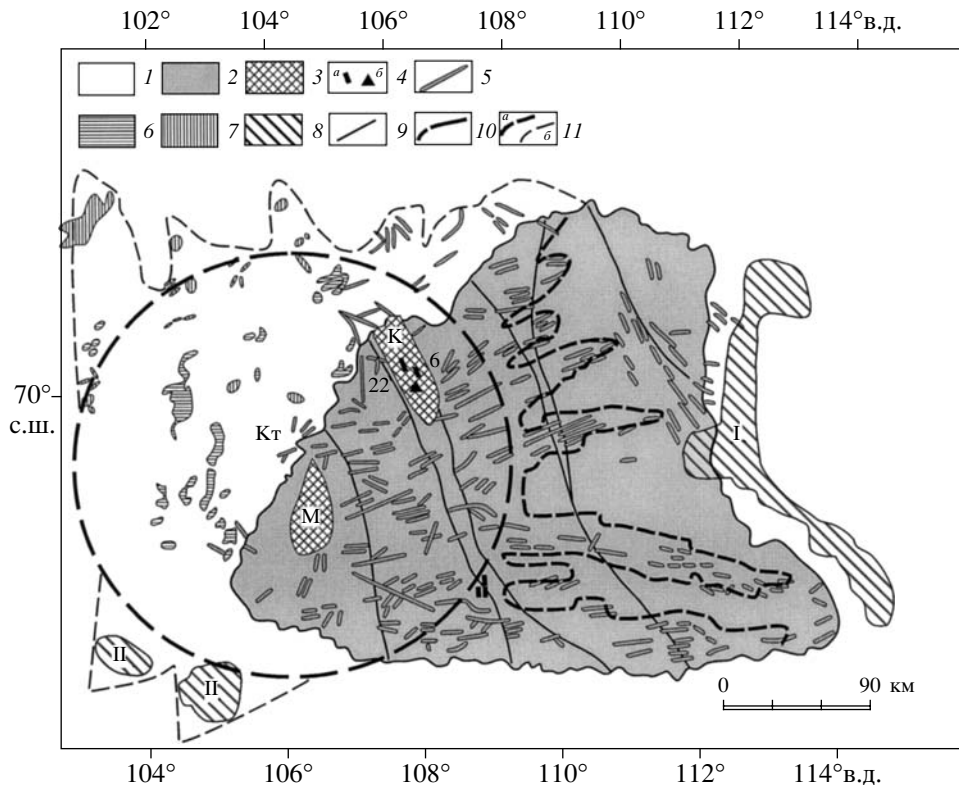


Рис. 1. Положение Котуйканской кольцевой структуры и полихронных магматических комплексов в районе Анабарского щита и его окрестностей. 1, 2 – нерасчлененные образования: 1 – платформенного чехла и 2 – Анабарского щита; 3 – купола с анортозитами: К – Котуйканский, М – Маганский; 4 – места находок псевдотахилитов и положение объектов исследования № 6 и 22 (вне масштаба); 5 – дайки долеритов протерозоя; 6 – габбро-диабазы триаса; 7 – ультраосновные щелочные интрузивы триаса; 8 – поля кимберлитов: триасово-юрских (I) и девано-каменноугольных (II); 9 – древние зоны разломов; 10, 11 – границы: 10 – Котуйканской кольцевой структуры (Кт) и 11 – связанных с ней полей повышенной трещиноватости (а – по данным компьютерной обработки линеаментных сетей, б – предполагаемые, скрытые под платформенным чехлом).

блоки размером 50×60 км последовательно (с коэффициентом 0.5) делятся на элементарные блоки вплоть до мелких глыб и брекчий, выявленных при полевых работах. В ходе полевых работ в русле р. Котуйкан были обнаружены крупные (более 1 м) неокатанные обломки пород, которые по текстурным признакам можно отнести к деформированным конусам разрушения, образующимся, как известно, в условиях взрывного (шокового) метаморфизма [1, 2]. Линеаментная сеть Анабарского щита и прилегающей территории была проанализирована компьютерной программой Arc View со встроенным модулем Spatial Analyste по показателю отношения длины линеаментов к единице площади. Можно отметить, что поля относительно высокой плотности линеаментов охватывают Анабарский сегмент Котуйканской кольцевой структуры и выступают за ее пределы в виде протяженных радиальных пучков (см. рис. 1).

Если псевдотахилиты типа А (представленные обеими петрографическими разновидностями) на юге Анабарского щита в долине р. Бол. Куонам-

ка были обнаружены давно [5], то псевдотахилиты типа В выделяются здесь впервые. Объектами исследований явились два мощных (200–400 м) и протяженных (более 1 км) тела этих пород, которые вскрываются в среднем течении р. Котуйкан. Первый объект (выделен под № 6 на рис. 1) расположен между Центральным и Восточным массивами анортозитов на левобережье р. Котуйкан в районе устья его притока – р. Левый Киригатин-Юрэх. В полосе шириной около 400 м вскрываются узкие (до первых метров) протяженные линзы черных афанитовых пород, которые благодаря округлым (оплавленным) включениям полевого шпата внешне похожи на миндалекаменные базальты. Они перемежаются с многометровыми полосами мелко- и микрокристаллических амфиболитов. Иногда на выветрелой поверхности афанитовых пород видны узоры продольного пластического течения протяженностью более 7 м и шириной от 0.7 до 2–3 м в раздувах. Амфиболиты можно рассматривать, скорее всего, как породы, которые претерпели наибольшую степень раскристаллизации псевдотахилитов. Это

Таблица 1. Содержание петрогенных (%) и редких элементов (г/т) в псевдотахилитах

Компонент	ан-6/1	ан-6/1а	ан-6/5б	ан-6/6	ан-6/10	ан-22	ан-22/4а
SiO ₂	44.05	46.74	56.01	58.12	50.17	64.99	62.60
TiO ₂	1.38	1.20	1.03	0.67	2.22	0.66	0.66
Al ₂ O ₃	9.10	13.82	13.89	15.05	13.80	14.30	15.50
FeO	7.28				8.92		4.31
Fe ₂ O ₃	8.26	14.41*	9.61*	6.14*	5.74	5.52*	1.61
MnO	0.19	0.23	0.13	0.08	0.22	0.07	0.09
MgO	13.80	7.71	4.94	3.84	5.60	2.55	3.00
CaO	9.80	9.96	5.99	5.01	6.70	3.74	4.70
Na ₂ O	2.29	2.67	3.11	3.87	2.75	3.34	3.78
K ₂ O	1.08	1.36	2.43	3.68	1.44	2.52	2.57
P ₂ O ₅	0.67	0.06	0.24	0.49	0.42	0.18	0.20
П.п.п.	2.47	1.83	2.34	2.78	2.64	1.74	1.14
Сумма	99.82	100.01	99.72	99.73	100.62	99.61	100.16
Co	He опр.	45	36	24	He опр.	17	He опр.
Cr	»	260	170	140	»	68	»
Ni	»	120	87	69	»	40	»
Sr	»	251	529	1048	»	340	»
Zr	»	74	184	236	»	263	»

* Fe₂O₃ – общее железо; ан-22 – среднее из четырех смешанных проб (б, в, г, д).

подтверждается обнаружением внешних признаков пластического течения материала и структур размером до 0.5 × 0.3 м со скорлуповатой шаровой отдельностью. Это гетерогенное тело псевдотахилитов местами прорвано жилами порфириобластических биотитовых гранитов, имеющими более широкое развитие в бассейне р. Котуйкан. Их возраст 1.84–1.87 млрд. лет (U–Pb-метод по циркону) [7].

Второй объект псевдотахилитов (рис. 1, № 22) расположен на правом берегу р. Котуйкан в центральной части купола, рассеченного продольной узкой зоной бластомилонитов, проходящей вдоль внешней границы Западного массива анортозитов. Однородное тело псевдотахилитов шириной 200–250 м располагается между этой зоной и анортозитами, имея с обоими резкие контакты. Сложено это тело плотными черными афанитовыми породами с округлыми (до 1–2 см) включениями полевого шпата.

подавляющая часть псевдотахилитов типа В, несмотря на их афанитовую текстуру, относится к милолистинитам. В их основной массе иногда распознаются биотит, плагиоклаз и калиевый полевой шпат. Относительно крупные (до 2 см) округлые (видимо, оплавленные) включения плагиоклаза и амфибола несут следы шокового ме-

таморфизма в виде ромбовидной системы микро-трещин. Некоторые зерна плагиоклаза по микро-трещинам разорваны, что устанавливается по симметрично зазубренным и разведенным краям этих трещин, между которыми развивается мелкочешуйчатый агрегат позднего биотита.

Для определения состава и возраста псевдотахилитов типа В на объекте № 6 из пород различного облика отбирались штучные пробы массой 1–2 кг. На более однородном объекте № 22 отбирались сколковые пробы на ограниченной (1–1.5 м²) площади вблизи контакта с анортозитами. Здесь критерием разделения проб служило разное количество включений плагиоклаза. Видно (табл. 1), что состав псевдотахилитов на объекте № 6 варьирует от ультраосновного до среднего. Это свидетельствует о гетерогенности субстрата, который подвергся неравномерному перетиранию и избирательному плавлению. Состав псевдотахилитов на ограниченном участке объекта № 22 по одной пробе и смеси из четырех проб, оказался близок к гранодиоритам (см. табл. 1). Судя по составу псевдотахилитов, которые в обоих случаях тесно контактируют с анортозитами, эти более древние породы не были вовлечены в процессы выплавления псевдотахилитов. Это заключение основано на том, что псевдотахилиты не обогащены малоподвижным глиноземом.

Таблица 2. Изотопные Sm–Nd-данные для псевдотахилитов

№ обр.	Содержание, ppm		Изотопные отношения		Модельный возраст, млн. лет		$\epsilon_{Nd}(1850)$
	Sm	Nd	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Sm/^{144}Nd$	CHUR	DM	
ан-6/6	12.033	78.892	0.092206	0.510869 ± 28	2569	2847	–9.74
ан-6/1	9.930	57.205	0.104938	0.510984 ± 16	2735	2964	–9.76
ан-6/10	5.835	24.090	0.146411	0.511838 ± 26	2418	2945	–9.72
ан-6/5б	6.446	37.728	0.103288	0.510905 ± 30	2814	3640	–9.70
ан-22/4а	7.423	46.126	0.097282	0.510836 ± 11	2683	3012	–11.60
ан-22/4б	6.635	42.673	0.093999	0.510787 ± 14	2495	2992	–11.78
ан-22/4в	6.376	40.572	0.094995	0.510804 ± 30	2624	2995	–11.68
ан-22/4д	10.889	60.057	0.109603	0.510981 ± 29	2878	3156	–11.70
ан-22/4е	7.003	44.353	0.095459	0.510809 ± 7	2828	3000	–11.69

Таблица 3. Изотопные Rb–Sr-данные для псевдотахилитов

№ обр.	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr \pm 2\sigma$	$\pm \Delta, \%$	Rb	Sr
				ppm	
ан-6/1	4.26041	0.82496 ± 35	0.047	115.12	79.14
ан-6/1а	0.216462	0.71216 ± 33	0.046	24.83	332.21
ан-6/5а	0.40601	0.71728 ± 31	0.043	83.24	594.44
ан-22/4а	0.479122	0.72191 ± 32	0.044	66.09	400.01
ан-22/4б	0.823357	0.73102 ± 34	0.047	104.85	369.71
ан-22/4в	0.624461	0.72533 ± 36	0.05	76.31	354.43
ан-22/4г	0.66548	0.72690 ± 31	0.044	83.47	362.21
ан-22/4е	0.602626	0.72530 ± 38	0.053	75.54	363.59

Результаты изотопно-геохронологических исследований пород, слагающих изученные гетерогенные тела псевдотахилитов, изохронным Sm–Nd- и Rb–Sr-методами, приведены в табл. 2 и 3 и изображены на соответствующих диаграммах (рис. 2). Полученные данные свидетельствуют о том, что закрытие этих изотопных систем осуществлялось почти одновременно около 1900 млн. лет. В это время происходило выплавление псевдотахилитов из архейского (средние величины $T_{DM} = 3031$ и 3099 млн. лет) корового протолита (отрицательные значения ϵ_{Nd}) и их метаморфизм с превращением в апопсевдотахилиты или милолиствиниты в условиях амфиболитовой фации при $T = 450\text{--}550^\circ\text{C}$ [9] и P до 2 ГПа и ниже. Согласно исследованиям [9, 10], именно такие термодинамические условия возникают на периферии крупных импактных структур.

Приведенные выше данные о составе и возрасте псевдотахилитов и их протолита служат подтверждением тому, что материал нижнекор-

вых анортозитов с возрастом магмогенерации 2.55 млрд. лет (Sm–Nd-метод [11]) не был вовлечен в процессы сдвигового трения континентальной коры и выплавления псевдотахилитов. А вот выдвигание анортозитовых куполов в верхние горизонты коры (закрытие K–Ar-системы 1820–1950 млн. лет назад [12]), а также внедрение порфиробластических гранитов (1840–1870 млн. лет [7]), сопровождаемые термальными процессами, произошло после дробления коры на ортогональные блоки. Эти процессы совпадают с временем метаморфизма псевдотахилитов и их превращением в милолиствиниты.

Таким образом, установление природы палеопротерозойских псевдотахилитов Анабарского щита необходимо рассматривать в их пространственной связи с крупной кольцевой структурой, имеющей взрывное происхождение. Во-первых, это конформные ей геофизические аномалии, типичные для крупных импактных структур, таких, например, как купол Вредефорт (Каапваальский

кратон, диаметр 300 км, возраст 2023 млн. лет) [1, 2, 14]. Во-вторых, это развитие в ареале геодинамического влияния кольцевой структуры радиально-дуговой системы разломов, порождающих соответствующую кусковатость архейского кристаллического основания. В-третьих, это проявления шокового метаморфизма в виде конусов разрушения, брекчий и разрывных деформаций в минералах [1, 2]. В-четвертых, это гетерогенное строение мощных тел псевдотахилитов со структурами продольного пластического течения, что согласуется с представлением об их связи с крупными импактными событиями и образовании в результате скольжения в узких сдвиговых зонах [3]. В-пятых, это выдвигание на этапе релаксации в верхние горизонты предварительно раздробленной коры доимпактных анортозитов, сопровождаемое выплавлением порфиробластических гранитов. С подобным, но более масштабным экстремальным подъемом доимпактной средней коры (3.1 млрд. лет) связывают природу гранулитового ядра и выплавление гранитов в центре взрывной структуры Вредефорт [1, 2]. Как видно, по всем перечисленным выше показателям Котуйканская кольцевая структура вполне сопоставима не только с этим куполом, но и с близкой ей по возрасту импактной структурой Садбери на Канадском щите (1850 млн. лет, диаметр 250 км [1, 2, 9, 10, 13]).

На основе проведенных комплексных исследований можно предположить, что 1.86–1.94 млрд. лет назад на севере (в современных координатах) Сибирского кратона произошло масштабное импактное событие. Оно было вызвано падением крупного астероида диаметром 14–20 км (скорость 20 км/с). Именно такие параметры ударника могли вызвать формирование кратера диаметром 250 км и глубиной 6–8 км, а также радиально-кольцевой системы разломов, проникающих до границы мантии (45–50 км) [1, 9, 10, 14]. Вследствие колоссальной энергии удара, после дробления коры и формирования псевдотахилитов в верхние горизонты коры была выжата нижнекоровая пластичная анортозитовая масса, что сопровождалось воздыманием куполов, выплавлением гранитов и метаморфизмом псевдотахилитов. К более удаленным последствиям импактного события можно отнести проявления полихронного мантийного магматизма, контролируемые радиально-кольцевой системой повышенной трещиноватости и магматической проницаемости фундамента. Это хорошо видно по роям протерозойских (1503–1730 млн. лет [15]) даек долеритов, распределению других фанерозойских интрузивов мантийного происхождения (см. рис. 1), а также по распределению

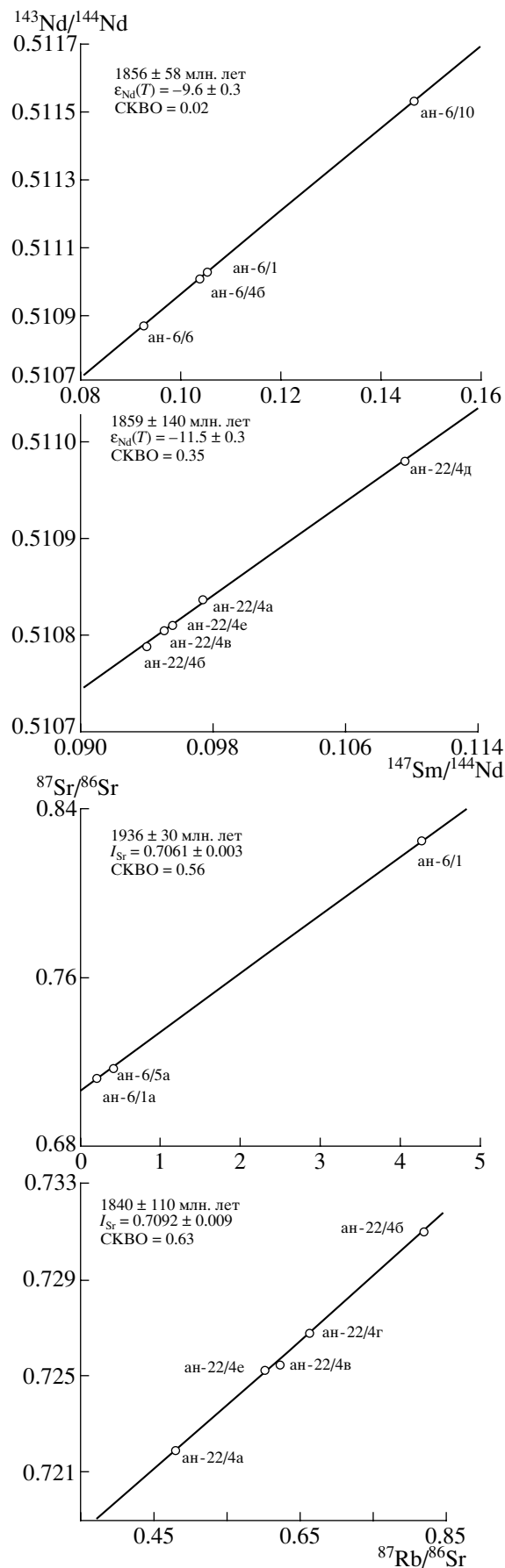


Рис. 2. Sm–Nd- и Rb–Sr-изохроны для псевдотахилитов объектов № 6 и 22.

растительного покрова, связанного с современным ареалом повышенного теплового потока.

Авторы признательны Л.В. Сазоновой (МГУ) за помощь в изучении метаморфизованных псевдотахилитов и А.Д. Шакину (ФГУ НПП “Аэрогеология”) за компьютерную обработку линейной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катастрофические воздействия космических тел / Под редакцией В.В. Адушкина, В.В. Немчинова. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2005. 310 с.
2. The Earth Impact Database <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>
3. *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.lpl.arizona.edu/imelosh/pseudotachylites.pdf>
4. *Rondot J.* Pseudotachilite and Mylonitization. In: Abstr. and Program LII Annu. Meet. Meteorit. Soc. Vienna, July 31–August 4, 1989. Houston (Tex.), 1989. P. 209.
5. *Лутиц Б.Г., Оксман В.С.* Глубокоэродированные зоны разломов Анабарского щита. М.: Наука, 1990. 260 с.
6. *Садовский М.А.* // ДАН. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–831.
7. *Степанюк Л.М.* // Докл. АН УССР. 1991. № 10. С. 127–129.
8. *Chesley J.T.* // Rev. Econ. Geol. 1999. V. 12. P. 119–125.
9. *Turtle E.P., Pierazzo E.* // Meteorit. Planet. Sci. 1998. V. 33. № 2. P. 483–490.
10. *Turtle E.P., Pierazzo E., O'Brien D.P.* // Meteorit. Planet. Sci. 2003. V. 38. № 2. P. 293–303.
11. *Розен О.М., Журавлев Д.З., Суханов М.К. и др.* // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 2. С. 163–180.
12. *Суханов М.К.* В кн.: Анортозиты Земли и Луны. М.: Наука, 1984. С. 61–85.
13. *Lana C., Reimold W.U., Gibson R.L. et al.* // Geochim. et cosmochim. acta. 2004. V. 68. № 3. P. 623–642.
14. *Ронка Л.Б.* В кн.: Взрывные кратеры на Земле и планетах. М.: Мир, 1968. С. 174–183.
15. *Эрнст Р.Э., Хейнс Дж. А.Б., Пучков В.Н. и др.* В кн.: Материалы ХLI Тектонического совещания. М.: Геос, 2008. Т. 1. С. 492–495.