

МЕГАБРЕКЧИИ ПОПИГАЙСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ: ИСТОЧНИК И СПЕЦИФИКА ОТЛОЖЕНИЯ “РАННИХ” ТАГАМИТОВ В ИХ СОСТАВЕ

© 2011 г. С. А. Вишнеvский, Н. А. Гибшер, Н. А. Пальчик

*Институт геологии и минералогии СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3
E-mail: svish@uiggm.nsc.ru;*

Поступила в редакцию 30.10.2009 г.

Рассмотрена специфика образования тел “ранних” тагамитов в мегабрекчиях Попигайской астроблемы. Эти тагамиты отвечают апогнейсовому импактному расплаву из краевой части зоны ударного плавления Попигайского импактного события (~14–15 км от центра), который вступил в динамический контакт с продуктами зоны дробления и умеренного импактирования (от ~20 до ~30 км от центра). Водонасыщенность “ранних” тагамитов (2.15 ± 0.79 мас. % H_2O) и спектры примесных элементов указывают, что источником этих расплавов были диафторированные хапчанские гнейсы. Плотные ($0.5\text{--}1$ г/см³) водные включения в мономинеральных стеклах из “ранних” тагамитов запечатывались при высоких, от ~0.2–0.7 до ~1.5–3.3 ГПа давлениях, спад которых контролировался водным буфером. Проведенные исследования показывают, что вода в импактных процессах способствует появлению мобильных расплавных систем с высокой проникающей возможностью и относительно “продолжительным” остаточным ударным давлением. Эта особенность флюидного режима импактитов должна учитываться при изучении астроблем на Земле, Марсе и других планетах, породы которых богаты водой и другими летучими.

Ключевые слова: *Попигайская астроблема, мегабрекчии, “ранние” тагамиты, флюидный режим расплавных импактитов.*

ВВЕДЕНИЕ

Попигайская астроблема является уникальной импактной структурой, которая по комплексу своих параметров (размеры, молодой возраст, разнообразие коптогенных формаций, часть из которых найдена пока только в этой структуре, хорошая сохранность и обнаженность) не имеет себе равных среди прочих астроблем Земли. Все это позволяет проследить различные особенности образования и эволюции ударно-взрывных структур, которые не всегда очевидны в других астроблемах такого масштаба. Одна из таких особенностей рассматривается ниже и касается специфики появления тел “ранних” тагамитов в составе попигайской донной мегабрекчии. Эти тагамиты отражают большую неустойчивость экскавационного течения при образовании Попигайского кратера и связаны с образованием высокоомобильных “струй” в центробежном донном потоке, в чем просматривается важная роль воды.

ГЕОЛОГИЯ МЕГАБРЕКЧИЙ

Донные мегабрекчии являются одной из главных импактных формаций Попигайской астроблемы. Основное их поле почти непрерывным кольцом выходов, шириной от 3–5 до 14–15 км, вскрывается по периферии кратера и находится в сложных смесительных контактах с клиппенами пород мишени

в зоне тектонического вала астроблемы. В направлении к центру кратера эти мегабрекчии перекрыты мощными толщами различных расплавных импактитов, а также отложениями взрывного облака – зювитами. Кроме основного поля донной мегабрекчии, известны ее изолированные тела, которые слабают импактные диатремы, закратерные “пятна” покровных отложений и другие выходы. Более подробные сведения по геологии астроблемы и ее импактитов приведены в обобщающих работах ряда авторов [4, 10, 23].

Мегабрекчии астроблемы представляют хаотическую смесь глыб различных пород мишени величиной от 1 до 100 м, которые сцементированы более мелкообломочными продуктами дробления этих же пород. Классическим примером данной формации является обнажение “Пестрые Скалы” (рис. 1). В глыбах этого обнажения ударный метаморфизм слабый (~5–7 ГПа и менее для осадочных пород чехла) или умеренный (не более 20–40 ГПа для гнейсов фундамента мишени). В частности, в гнейсах этого обнажения в астроблеме был впервые диагностирован стишовит [6]. Согласно известным представлениям теории импактного кратерообразования, зафиксированные пределы ударных давлений указывают, что глыбовый материал этого обнажения поступил из краевой зоны импактирования, ограниченной расстояниями от ~20 до ~30 км от центра взрыва). Резким контрастом с кластическими продуктами слабого и умеренного ударного

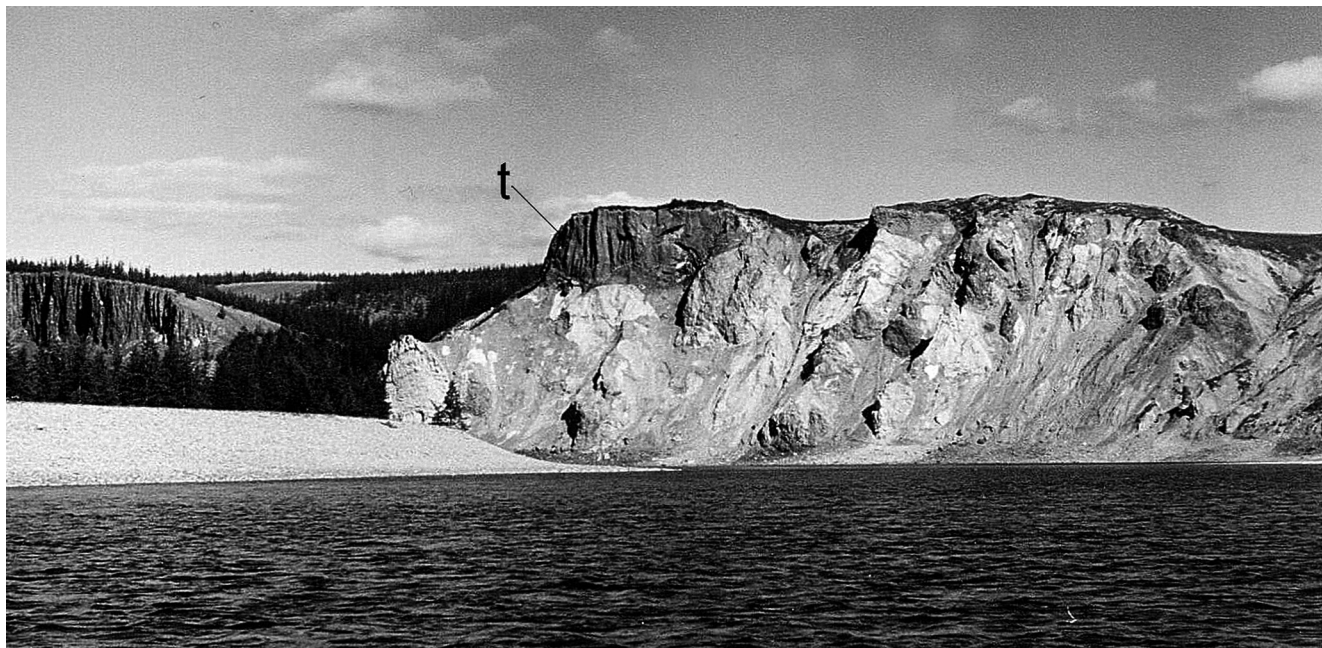


Рис. 1. Обнажение мегабрекчии “Пестрые Скалы” в западном борту Попигойской астроблемы, которое представляет один из самых впечатляющих выходов импактитов данной формации. Обнажение венчается “шляпой” “поздних” тагамитов (t), которые с резким неровным контактом и временным перерывом отложились на мегабрекчию. На дальнем плане слева – скальные выходы мощного тагамитового покрова, который налегает на мегабрекчию по направлению к центру кратера.

метаморфизма являются включения апогнейсовых расплавных импактитов – тагамитов, наблюдаемые в мегабрекчии. Они слагают неправильные массы различной величины (вплоть до тел объемом в десятки куб. метров) в цементе мегабрекчии или инъективные внедрения в ее глыбах. Образование тагамитов связано с сильным ударным метаморфизмом гнейсов мишени при давлениях $>50\text{--}60$ ГПа. Следы течения, турбулентного смешения и инъективного взаимодействия тагамитового расплава с обломками указывают, что в момент отложения мегабрекчии он находился в мобильном жидко-пластичном состоянии и является сингенетичным компонентом этой формации, а его тела можно выделять как “ранние” тагамиты.

Выше по разрезу на мегабрекчию обнажения с временным перерывом налегает мощная толща апогнейсовых расплавных импактитов-тагамитов (рис. 1). Этот перерыв фиксируется по прослою зювитового песка в основании указанной толщи и по включениям зювитов, то-есть, отложений взрывного облака, в кровле разреза самой мегабрекчии. По наличию временного перерыва в отложении расплавных импактитов перекрывающей толщи мы выделяем как “поздние” тагамиты. Взаимодействие тагамитов и мегабрекчии в описываемом обнажении считалось результатом простого смешения обломочного материала с потоками импактного расплава на завершающих стадиях экска-

вации кратера. Однако, вследствие временного перерыва между отложением мегабрекчии и “поздних” тагамитов, такой вывод не подтвердился, и внутрiformационные тела “ранних” тагамитов в данном обнажении остались непонятным феноменом. Детальное изучение этих тагамитов, результаты которого излагаются ниже, позволило выявить особый источник их расплава и более сложную динамику его взаимодействия с обломками пород мегабрекчии. Кроме того, результаты исследований позволяют считать, что этот процесс во многом контролировался водой.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА “РАННИХ” ТАГАМИТОВ

Тела этих тагамитов сложены темно-серой пористой, а на отдельных участках даже пемзовидной стекловатой породой, которая “сварена” с цементом или глыбами мегабрекчии и обладает флюидальной текстурой. Порода насыщена множеством мелких псаммитовидных обломков архейских пород и их минералов, лейкократовая фракция которых придает тагамитам псевдопорфировый облик. Эти обломки несут следы ударного метаморфизма разных ступеней, в том числе с появлением апокварцевых и апо-полевошпатовых мономинеральных стекол плавления, отвечающих III–IV стадиям импактирования кристаллических пород по [21]. Базис поро-

Таблица 1. Химические составы (мас. %) “ранних” тагамитов и их мономинеральных стекол из мегабрекчии Попигайской астроблемы (обнажение “Пестрые Скалы”)

№№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма
<i>Тагамиты</i>											
1 (3)	64.36	0.92	16.43	4.86	0.66	0.07	1.98	2.35	3.19	0.10	94.92
2 (2)	58.10	0.65	17.92	6.89	2.55	0.10	2.00	2.29	3.92	0.05	94.47
3 (4)	59.81	0.64	16.68	7.25	4.03	0.09	3.04	2.42	2.67	0.08	96.71
4 (2)	62.08	0.84	18.59	5.27	0.75	0.03	2.09	2.23	2.87	0.09	94.84
5 (1)	61.54	0.82	18.51	2.72	0.60	0.04	3.90	2.62	2.77	0.08	93.60
6 (2)	59.32	0.92	17.18	5.64	2.94	0.08	2.57	2.42	3.85	0.08	95.00
7 (1)	61.00	0.91	17.00	5.00	2.09	0.07	3.08	2.22	2.61	0.11	94.09
8 (1)	61.05	0.85	18.82	2.76	0.63	0.04	3.54	3.36	3.30	0.08	94.43
9 (1)	58.44	0.82	17.20	8.13	3.41	0.09	3.37	2.59	2.99	0.10	97.14
10 (1)	60.50	0.94	18.74	4.40	0.97	0.05	3.42	2.95	3.56	0.09	95.62
<i>Лешательериты и высоко-кремнеземные стекла</i>											
11 (1)	99.16	<0.01	<0.01	0.09	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.02	<0.01	99.30
12 (2)	98.43	0.01	0.03	0.05	0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.05	<0.01	98.60
13 (5)	97.08	0.03	0.04	0.12	0.01	<0.01	0.03	0.02	0.04	0.01	97.38
14 (1)	91.86	0.09	1.40	1.10	0.44	<0.01	0.07	0.34	1.38	<0.01	96.68
15 (3)	91.08	0.06	0.79	0.34	0.17	<0.01	0.72	0.15	0.59	0.04	93.94
16 (3)	76.67	0.34	7.68	2.85	1.53	0.03	1.47	0.82	3.71	0.09	95.19
<i>К-Na и апоплагиоклазовые стекла</i>											
17 (8)	64.73	0.05	19.00	0.01	0.01	<0.01	0.56	4.86	6.87	0.12	96.21
18 (8)	65.23	0.04	19.06	0.02	0.01	0.01	0.38	4.44	7.28	0.11	96.58
19 (6)	64.25	0.03	18.78	0.06	0.02	0.01	0.81	5.35	5.17	0.14	94.62
20 (3)	61.83	0.01	19.41	0.02	0.02	<0.01	0.60	4.68	4.85	0.06	91.48
21 (6)	63.18	0.01	18.58	0.06	0.02	<0.01	0.79	3.71	4.51	0.10	90.96
22 (4)	63.58	0.01	18.66	0.03	0.02	<0.01	0.44	3.39	4.68	0.11	90.92
23 (3)	63.03	0.01	18.55	0.08	0.03	<0.01	0.55	4.14	5.02	0.10	91.51
24 (2)	63.26	<0.01	18.55	0.01	0.01	<0.01	0.43	4.16	4.74	0.08	91.24
25 (1)	63.35	0.02	18.44	0.16	0.04	<0.01	1.95	3.15	5.30	0.15	92.56
26 (3)	59.56	0.02	23.95	0.31	0.08	<0.01	6.27	6.44	1.88	0.07	98.58

Примечание. Количественный рентгеноспектральный анализ, микрозонд JXA-5A (Новосибирск), аналитик Л.Н. Поспелова; FeO = FeO + Fe₂O₃; для каждого анализа приведено среднее из нескольких определений, число которых указано в скобках после номера анализа.

ды раскристаллизован в микро- и криптозернистые агрегаты оптически-неидентифицируемых кристаллитов. Обилие реститных обломков гнейсов и их минералов позволяет считать тагамиты продуктами краевой зоны ударного плавления гнейсов мишени, с ударными давлениями >50–60 ГПа. Для Попигайской астроблемы радиус такой зоны составил ~14–15 км.

Апокварцевые стекла плавления представлены флюидальным лешательеритом (SiO₂–95–99 мас. %) или высоко-кремнеземными (SiO₂ – 75–91 мас. %) разностями с заметными содержаниями К, Na, Са и Al (табл. 1). Для этих стекол характерны не “шлировые”, а четко выраженные “обломочные” формы выделения, то-есть, на заключительных стадиях динамического взаимодействия тагамитового расплава с материалом мегабрекчии шлиры таких стекол были уже закалены и подверглись дроблению (рис. 2). Размеры обломков лешательерита и высоко-кремнеземных стекол варьируют от микроскопических выделений до включений в 3–5 см ве-

личиной. Все разности этих стекол чистые, свежие и четко отделены от вмещающего базиса породы. На диффрактограммах стекол отмечается широкое “гало” аморфной фазы, которая резко доминирует в составе исследованного материала, но сопровождается незначительной примесью кварца и тридимита/кристобалита.

Апополевошпатовые стекла также обладают флюидальной текстурой, но для них характерны “шлировые” формы выделений, которые указывают на то, что даже на завершающих стадиях динамического взаимодействия тагамитового расплава с материалом мегабрекчии эти стекла оставались в жидком состоянии (рис. 3). Шлиры апополевошпатовых стекол чистые, свежие и четко отделены от расплавленного базиса породы. В ряде К-Na апо-полевошпатовых стекол наблюдаются реликты пертитовой структуры родительского минерала с характерной упорядоченностью “волокон”, особенно отчетливые при диафрагмированном освещении.

ВАЛОВАЯ ПЕТРОХИМИЯ “РАННИХ” ТАГАМИТОВ И ИХ СТЕКОЛ

В петрохимическом отношении (табл. 1, анализы 1–10) указанные тагамиты сравнительно однородны, а их средний химический состав близок к прочим расплавленным импактитам астроблемы, таким как тагамиты, а также стекла донных брекчий и зювитов. Отметим, что расплавленные импактиты астроблемы в резко доминирующем количестве являются апогнейсовыми продуктами ударного плавления кристаллических пород мишени [10, 23]. Однако, в сравнении с ними “ранние” тагамиты имеют более низкие суммы анализов, от 93.60 до 97.14 мас. %, что предполагает их повышенную насыщенность летучими компонентами, к чему мы вернемся ниже.

О химическом составе апокварцевых стекол (табл. 1, анализы 11–16) уже говорилось выше. Добавим, что по нашим прежним данным [8, 22], высококремнеземные разности таких стекол с существенными примесями K, Na, Ca и Al, которые известны в других импактатах Попигойской астроблемы, являются продуктами раннего импактного анатексиса гнейсов, и их образование протекало с селективной мобилизацией ряда петрогенных химических элементов при участии воды. Кроме указанных петрологических заключений, возможность такой мобилизации подтверждается экспериментами по высокоамплитудному ударному сжатию горных пород [14, 18]. Продукты раннего импактного анатексиса гнейсов представляли гидратированные импактные расплавы или даже суперкритические водно-силикатные флюиды с неограниченной смесимостью компонентов [22].

Среди апополевошпатовых стекол доминируют K-Na разности с умеренной примесью Ca (0.38–0.81 мас. % CaO), которые отвечают “ортоклаз-микроклиновой” компоненте родительского гнейса (табл. 1, анализы 17–24). Встречен один шлик K-Na стекла, обогащенного Ca (1.95 мас. % CaO), а также один шлик апо-плагиоклазового стекла (6.27 мас. % CaO), который соответствует “олигоклаз-андезиновому” составу родительского минерала гнейса (анализы 25 и 26 в табл. 1, соответственно).

ВОДОНАСЫЩЕННОСТЬ И ПРИМЕСНЫЕ МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В “РАННИХ” ТАГАМИТАХ И ИХ СТЕКЛАХ

С применением ионного зонда выполнено исследование примесных компонент в гиалиновой матрице “ранних” тагамитов (8 индивидуальных образцов) и в мономинеральных стеклах из этих пород (1 анализ апокварцевого стекла и 10 анализов апо-полевошпатовых стекол) (табл. 2). В этих образцах определялось содержание летучих (H_2O и F), а также малых, редких, рассеянных и редкоземельных элементов.

Содержания воды и фтора в образцах “ранних” тагамитов характеризуется следующими параметра-

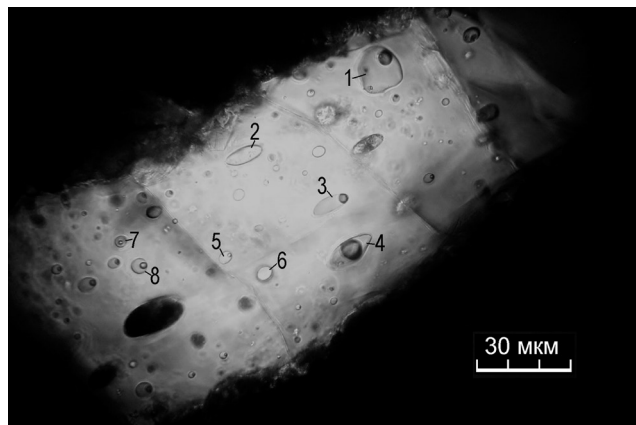


Рис. 2. Обломок лешательерита из тела “ранних” тагамитов в мегабрекчии.

В стекле содержатся разно-плотные газовой-жидкие флюидные включения. Цифрами 1–8 обозначены включения, результаты исследования которых приведены в табл. 4. Попигойская астроблема, обнажение “Пестрые Скалы”, обр. № 2189/2-5-3. Микрофотография, поляризованный свет, без анализатора.

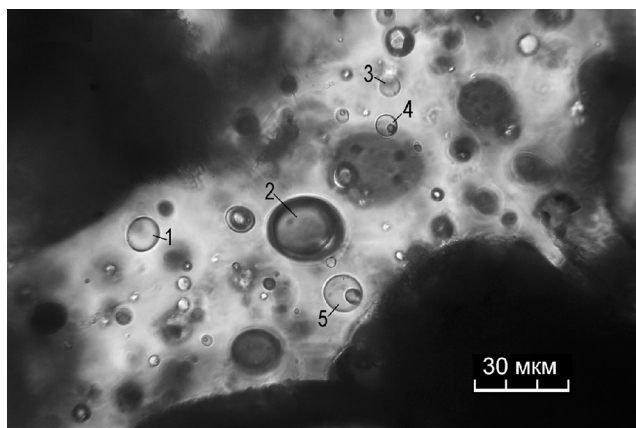


Рис. 3. Шлик K-Na апополевошпатового стекла из тела “ранних” тагамитов в мегабрекчии.

В стекле содержатся разно-плотные газовой-жидкие флюидные включения. Цифрами 1–5 обозначены включения, результаты исследования которых приведены в табл. 4. Попигойская астроблема, обнажение “Пестрые Скалы”, обр. № 2189/2a-2-A. Химический состав этого стекла приведен в табл. 1 (анализ № 19). Микрофотография, поляризованный свет, без анализатора.

ми (диапазон колебаний, среднее и стандартное отклонение, все в мас. %): по H_2O – 1.14–3.39, 2.15 ± 0.79 ; по F – 0.126–0.235, 0.171 ± 0.032 . Таким образом, исследованные тагамиты обладают повышенным содержанием воды. Содержание воды в мономинеральных K-Na стеклах подчас довольно значительное и составляет от 1.16 до 6.27 мас. %, а содержание фтора варьирует от 0.001 до 0.087 мас. %. В обогащенном Ca стекле содержания этих летучих составляют 4.2 мас. % H_2O и 0.076 мас. % F;

Таблица 2. Вода, фтор, суммы микронзондовых анализов и общая сумма всех определений по “ранним” тагамитам из обнажения “Пестрые Скалы” и их мономинеральным стеклам

№№ в табл. 1	№№ ионного анализа	№№ образца	H ₂ O, мас. %	F, мас. %	*Сумма R, мас. %	Общая сумма всех анализов, мас. %
<i>Тагамиты</i>						
1	Vis-7	2189/2-2-1	1.14	0.183	94.92	96.24
2	Vis-10	2189/2-5-1Б	1.15	0.183	94.47	95.80
3	Vis-12	2189/2а-2-1	1.92	0.149	96.71	98.78
4	Vis-13	2189/2-6-2	2.81	0.126	94.84	97.78
5	Vis-17	2189/2-5-2	2.43	0.154	93.60	96.18
7	Vis-22	2189/2а-2-4.5	2.17	0.179	94.09	96.44
8	Vis-23	2189/2а-2-4.5	3.49	0.235	94.43	98.16
9	Vis-27	2189/2а-3-7	2.07	0.162	97.14	99.37
<i>Мономинеральные стекла</i>						
14	Vis-26	2189/2а-3-7	1.16	0.011	96.68	97.85
17	Vis-8	2189/2-5-1а	3.04	0.003	96.21	99.25
18	Vis-9	2189/2-5-1б	2.42	0.001	96.58	98.00
19	Vis-11	2189/2а-2-1	4.41	0.087	94.62	99.12
20	Vis-16	2189/2-5-2	5.06	0.002	91.47	96.53
21	Vis-18	2189/2а-2-4.5	5.46	0.021	90.96	96.44
22	Vis-19	2189/2а-2-4.5	5.67	0.033	90.92	96.62
23	Vis-20	2189/2а-2-4.5	4.91	0.060	91.51	96.48
24	Vis-14	2189/2-5-1	6.27	0.024	91.24	97.53
25	Vis-25	2189/2а-3-7	4.2	0.076	92.56	96.84
26	Vis-24	2189/2а-3-7	0.50	0.092	98.58	99.17

Примечание. * – сумма микронзондового анализа стекол. В первой колонке приведены №№ анализов, указанных в Табл. 1, в том числе: 1–9 – смешанное стекло тагамитов; 14 – шпир высоко-кремнеземного стекла; 17–24 – шпир К-На мономинеральных стекол; 25, 26 – шпир обогащенного Са и апо-плагиоклазового стекла, соответственно. Количественный ионный анализ, микронзонд Cameca IMS-4F, аналитик С.Г. Симакин (Ярославль).

“олигоклаз-андезиновое” стекло оказалось довольно “сухим”: H₂O – 0.50 мас. % и F – 0.092 мас. % (табл. 2). В высоко-кремнеземных стеклах, которые описаны в настоящей работе, летучие компоненты пока не изучались, но в одном из таких стекол (анализ № 14, табл. 1, 2) обнаружено 1.16 мас. % H₂O и 0.011 мас. % F.

Содержания малых, редких, рассеянных и редкоземельных элементов, замеренные в гиалиновом базисе “ранних” тагамитов, приведены в табл. 3. Здесь получены следующие результаты (среднее содержание и стандартное отклонение, все в ppm): Rb – 121 ± 15.5; Sr – 246 ± 28.01; Ba – 1021 ± 177.6; Ti – 6290 ± 453; V 108 ± 40.3; Cr – 388 ± 257 для 7 анализов, а в анализе Vis-10 обнаружено 4410 ppm Cr; Y – 43.7 ± 4.58; Zr – 217 ± 17.8; Nb – 19.3 ± 2.17; Ta – 2.09 ± 0.26; Hf – 5.89 ± 0.42; Th – 15.6 ± 2.23; U – 1.53 ± 0.16. Спектры лантаноидов (рис. 4) обладают следующими особенностями: 1) их суммы варьируют в пределах 234.08–376.6; 2) степень фракционирования (La_N/Yb_N) средняя или относительно высокая: 6.7–10.12; 3) “тяжелая” (Gd–Yb) часть спектра субгоризонтальна, в то время как его “легкая” (La–Sm) часть более крутая, с соотношением La_N/Sm_N = 4.24–4.98, что указывает на относительное обогащение элементами La-Sm группы; 4) соотношение “легких” к “тяжелым” лантаноидам составляет 8.78–11.88; 5) все анализы показали четкую отрицательную аномалию европия, Eu/Eu* = 0.35–0.81.

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МОНОМИНЕРАЛЬНЫХ СТЕКЛАХ ИЗ “РАННИХ” ТАГАМИТОВ

В обломках лешательерита и высоко-кремнеземных стекол содержатся весьма разно-плотные газовой-жидкие включения, так что в пределах даже одной частицы стекла можно одновременно наблюдать всю их гамму, начиная от всецело жидких до существенно-газовых пузырьков (рис. 2). Аналогичные разно-плотные газовой-жидкие включения одновременной консервации обильно насыщают шпир К-На апо-полевошпатовых стекол (рис. 3). Термометрия флюидных включений в обоих типах стекол выявила широкий спектр температур гомогенизации этих включений, начиная от 100 до 420°C (рис. 5), с переводом содержимого как в жидкую, так и в газовую фазу. Согласно криометрии, жидкая фаза включений из обоих типов стекол представляет мало- и умеренно-соленые водные растворы, с соленостью от 4 до 13 мас. % в NaCl-эквиваленте для лешательеритов и высоко-кремнеземных стекол, и от 7 до 14 мас. % в NaCl-эквиваленте для К-На апополевошпатовых стекол (рис. 5). Примеры результатов индивидуального криометрического анализа включений из обоих типов стекол приведены в табл. 4.

Таблица 3. Некоторые малые, редкие, рассеянные и редкоземельные элементы (ppm), замеренные в “ранних” тагамитах из обнажения “Пестрые Скалы”, Попигайская астроблема

Элемент	№ анализа							
	Vis-7	Vis-10	Vis-12	Vis-13	Vis-17	Vis-22	Vis-23	Vis-27
<i>Малые, редкие и рассеянные элементы</i>								
Rb	110	134	90.8	116	140	120	128	118
Sr	282	235	282	241	220	202	258	246
Ba	991	1030	801	1380	1130	881	1040	918
Ti	6270	6120	5290	6720	6540	6510	6620	6250
V	70.1	116	104	54.0	121	190	103	103
Cr	80.8	4410	421	449	885	381	333	169
Y	43.1	44.4	34.7	50.5	47.0	41	44.4	44.3
Zr	254	198	222	226	213	199	214	212
Nb	19.8	18.4	17.4	23.0	18.7	16.5	21.8	18.8
Ta	1.94	2.05	1.63	2.24	2.20	2.09	2.54	2.05
Hf	6.43	5.27	6.27	5.88	5.81	5.52	6.34	5.65
Th	17.9	14.6	14.5	18.1	15.3	11.4	15.7	17.5
U	1.69	1.33	1.38	1.61	1.46	1.41	1.75	1.62
<i>Лантаноиды</i>								
La	65.4	61.9	52.6	79.4	66.7	48.1	63.2	63.0
Ce	138	128	106	171	140	104	127	128
Nd	53.0	51.0	40.0	67.8	56.5	38.8	52.6	50.2
Sm	8.95	9.18	7.12	11.2	9.24	6.71	7.99	8.68
Eu ¹⁵³	1.53	1.53	1.79	1.59	1.94	0.705	1.90	1.40
Gd ¹⁵⁸	9.28	8.86	7.61	8.81	9.93	5.82	6.34	6.64
Dy ¹⁶³	6.81	7.58	5.89	7.91	8.23	6.71	7.44	7.27
Er ¹⁶⁷	4.84	4.85	4.16	5.28	5.29	5.13	4.97	4.98
Yb ¹⁷⁴	4.37	4.37	3.76	5.73	4.77	4.85	4.94	5.22

Примечание. Номера ионных анализов те же, что и в табл. 2; количественный ионный анализ, микрозонд Cameca IMS-4F (Ярославль), аналитик С.Г. Симакин.

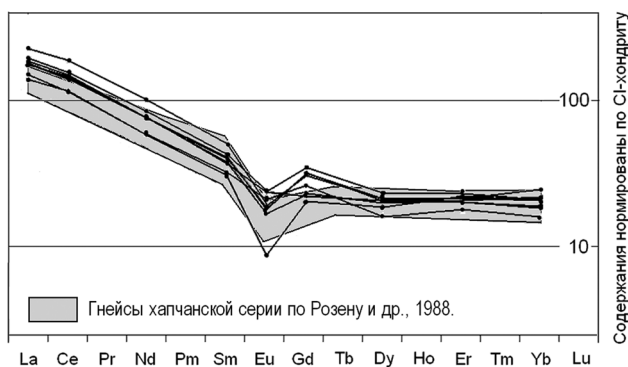


Рис. 4. Спектры редкоземельных элементов в “ранних” тагамитах из обнажения мегабрекций “Пестрые Скалы”, Попигайская астроблема.

Серым цветом показано поле спектров клинопироксеновых гнейсов хапчанской серии по [13]. Ионный анализ, микрозонд Cameca IMS-4F (Ярославль), аналитик С.Г. Симакин.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже говорилось выше, внутриформационное залегание “ранних” тагамитовых тел в донной мегабрекции обнажения “Пестрые Скалы”, да еще

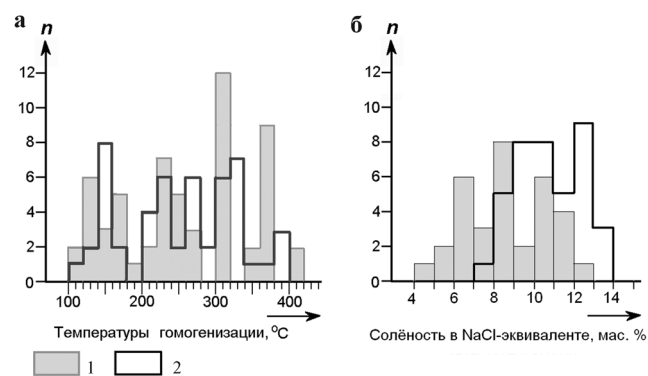


Рис. 5. Результаты термобарогеохимического исследования индивидуальных газожидких включений в мономинеральных стеклах из тел “ранних” тагамитов в мегабрекциях Попигайской астроблемы, обнажение “Пестрые Скалы”.

1 – лешательит и высококремнезенистые стекла, 59 и 33 замера для а и б, соответственно; 2 – К-Na апополевошпатовые стекла, 54 и 40 замеров для а и б, соответственно.

в отрыве от основной массы импактного расплава, который поступил из центральной зоны растущего кратера позднее (на это указывает временной перерыв между отложением мегабрекций и толщи “поздних” тагамитов) было непонятным феноме-

Таблица 4. Примеры криометрического анализа индивидуальных флюидных включений в лешательерите (рис. 2) и К-На апополевошпатовом стекле (рис. 3) из “ранних” тагамитов в мегабрекчии Попигайской астроблемы (обнажение “Пестрые Скалы”)

№№ включений на рисунках	Тип включений	Соотношение жидкости и газа при 20°C	Температура эвтектики, °C	Температура плавления льда, °C	Соленость, мас. %, в NaCl-эквиваленте
<i>Лешательерит, рис. 2</i>					
1	Ж _{H₂O} + Г	80:20	-28.1	-5.7	9.6
2	Ж _{H₂O}	100:0	-27.4	-4.1	8.1
3	Ж _{H₂O} + Г	80:20	-29.4	-4.7	8.6
4	Ж _{H₂O} + Г	50:50	-29.7	-3.9	7.7
5	Ж _{H₂O} + Г	80:20	-31.1	-2.7	5.1
6	Ж _{H₂O}	100:0	-30.8	-3.1	6.1
7	Ж _{H₂O} + Г	70:30	-29.3	-3.5	7.0
8	Ж _{H₂O} + Г	70:30	-28.8	-3.6	7.1
<i>К-На апополевошпатовое стекло, рис. 3</i>					
1	Ж _{H₂O}	100:0	-29.5	-8.1	12.6
2	Г + Ж _{H₂O}	90:10	—	—	—
3	Ж _{H₂O} + Г	80:20	-29.7	-6.5	10.5
4	Ж _{H₂O} + Г	80:20	-26.1	-5.9	9.9
5	Ж _{H₂O} + Г	70:30	-23.4	-8.1	12.6
6	Ж _{H₂O} + Г	60:40	-28.2	-8.7	12.7
7	Ж _{H₂O} + Г	90:10	-31.6	-6.3	10.3
8	Ж _{H₂O}	100:0	-31.3	-5.8	9.8
9	Ж _{H₂O} + Г	70:30	-26.8	-6.0	10.0
10	Ж _{H₂O}	100:0	-26.3	-5.1	9.1
11	Ж _{H₂O} + Г	70:30	-23.5	-9.0	13.5
12	Ж _{H₂O} + Г	60:40	-25.6	-4.3	8.3
13	Г + Ж _{H₂O}	90:10	—	—	—
14	Г + Ж _{H₂O}	90:10	—	—	—
15	Г + Ж _{H₂O}	90:10	—	—	—
16	Г + Ж _{H₂O}	90:10	—	—	—

Примечание. Символика состава включений: Ж_{H₂O} – жидкая вода, Г – газовая фаза. Во включениях №№ 2 и 13–16 (К-На стекла) явления эвтектики и плавления льда не проявились, поэтому соленость здесь не определена; включения №№ 6–12 на рис. 3 не показаны, так как они находились вне фокуса данного кадра.

ном. Напомним, что “ранние” порции тагамитового расплава поступили из краевой части зоны ударного плавления (~14–15 км от центра взрыва), а кластический материал мегабрекчии – из зоны умеренного импактирования (в интервале от ~20 до ~30 км от центра взрыва). Для того чтобы состоялся динамический контакт и инъективное взаимодействие масс “раннего” тагамитового расплава с глыбами гнейсов из зоны умеренного импактирования, он должен был обладать высокой мобильностью, испытать взрывную дезинтеграцию и в опережающем режиме отделиться от основной массы продуктов зоны ударного плавления; далее турбулентные смеси обломков и масс “раннего” расплава переместились в процессе экскавации в краевую часть растущего кратера, где отложились с образованием мегабрекчии. Геохимическая специфика “ранних” тагамитов, прослеженная по содержаниям летучих компонентов и элементов-примесей, позволяет сделать заключение об особом источнике таких расплавов и причине их высокой мобильности.

Так, по содержанию лантаноидов “ранние” тагамиты весьма близки к клинопироксеновым гней-

сам хапчанской серии Анабарского щита (рис. 4), геохимия которых подробно охарактеризована Розеном и др. [13]. Кроме того, сравнение с данными Розена и др. [13] показывает, что указанные тагамиты весьма близки не только к хапчанским гнейсам, но и, одновременно, к диафоритам амфиболитовой фации, которые возникли по этим породам, по содержаниям примесных микроэлементов. Это можно видеть по содержаниям Th, U и по соотношению Th/U (10.20 ± 1.09) в “ранних” тагамитах, а также по содержаниям V, Zr и Nb в этих породах (данные по Hf и Y в работе Розена и др. [13] отсутствуют). Более высокие содержания Sr, Ba и Rb, которые найдены в тагамитах, вероятно, связаны с влиянием диафореза.

Следующим шагом в интерпретации родительского источника исследованных тагамитов послужило их водосодержание. Ранее было установлено [5, 23], что по этому параметру все апогнейсовыи расплавы импактиты Попигайской астроблемы разделяются на две группы: “сухие” и “влажные” (со средним содержанием воды, соответственно, в 0.74 ± 0.18 и 2.23 ± 0.48 мас. %). Поскольку “ран-

ние” тагамиты обнажения относятся к “влажному” типу (2.15 ± 0.79 мас. % H_2O), а хапчанские гнейсы являются весьма “сухими” (согласно [13], даже общие потери при прокаливании для этих пород составляют 0.31–0.95 мас. % и лишь изредка достигают 1.31 мас. %), то наиболее вероятным источником расплава указанных тагамитов послужили диафториты, образованные по хапчанским гнейсам.

Вместе с повышенным водосодержанием “ранних” тагамитов, указывающим на их особый источник в породах мишени, важные данные о P - T и временных параметрах их транспортировки и взаимодействия с кластическим материалом мегабрекции дает информация по флюидным включениям из мономинеральных стекол, которая представлена в настоящей работе.

Так как, несмотря на свою высокую чувствительность к наложенным процессам, эти стекла остались свежими, то все их флюидные включения являются сингенетическими и не подвергались перенаполнению и расшнурованию. Отметим, что подобные разно-плотные флюидные включения в мономинеральных стеклах плавления весьма характерны для попигайских импактитов [3, 5, 8, 22]. Причина одновременной консервации таких включений в мономинеральных стеклах связана со спецификой ударного метаморфизма и объясняется присутствием ему крайней неравномерностью и высокой скоростью изменений. Такая характерная неравномерность весьма часто наблюдается в импактитах. Применительно к кварцу, например, она выражается тем, что даже в пределах одного и того же зерна минерала можно наблюдать широкую гамму ударных изменений, начиная от появления планарных структур при сохраняющемся двупреломлении минерала (7–15 ГПа) и заканчивая образованием изотропных диаплектических стекол (35–50 ГПа). Поэтому возникшие импактные расплавы исходно имели сложную тепловую микроструктуру, с чередованием “горячих” и “холодных” объемов, а процессы термодиффузии и закалки при остаточных ударных давлениях (см. ниже) позволяли сохранять плотные включения в “холодных” точках такого расплава, в то время как в “горячих” точках перегретый флюид мог расширяться и, по мере спада давлений, консервировался во включениях низкой плотности. Таким процессам способствовала высокая температура стеклования мономинеральных расплавов.

Плотные, ~ 0.5 – 1 г/см³, водные включения в изученных стеклах фиксируют высокое давление своей консервации [3, 5, 8, 22]. В самом деле [1, 11, 15], температура плавления кварца может варьировать от $\sim 1450^\circ\text{C}$ до $\sim 1700^\circ\text{C}$ (метастабильный и “сухой” варианты), а температура плавления высоко-кремнеземных стекол, согласно экспериментам [11, 15], составляет 1400 – 1500°C . Тогда давления консервации плотных включений в лещательрите и высоко-кремнеземных стеклах соглас-

но фазовой диаграмме воды по [16] составляли от ~ 0.7 – 0.8 до 3.3 ГПа (рис. 6, А). Температуры плавления К-На апо-полевошпатовых стекол могли варьировать от ~ 1100 – 1200°C (“сухое” плавление) до $\sim 700^\circ\text{C}$ (“влажное” плавление по [11]), и давления консервации плотных включений в этих стеклах по диаграмме [16] составляли от ~ 0.2 – 0.5 до 1.5 – 2.6 ГПа (рис. 6, В).

Литостатический вариант столь высоких давлений для тагамитов из мегабрекции обнажения “Петрские Скалы” исключен. Этот парадокс объясняется закалочным стеклованием мономинеральных расплавов с изначально неоднородной тепловой микроструктурой при остаточном ударном давлении. Более того, для консервации высоко-барических водных включений такое давление должно было сохраняться на довольно продолжительное время, достаточное для закалки “холодных” очагов расплава в масштабе от первых сотен мкм до первых мм, как это наблюдается по включениям в стеклах. Однако в “сухих” сжатых системах с быстрой адиабатической разгрузкой от ударных давлений эффективная термодиффузия в расплавах весьма проблематична. Из этого следует, что частичная закалка описанных расплавов в “ранних” тагамитах происходила при замедленной разгрузке среды от ударных давлений.

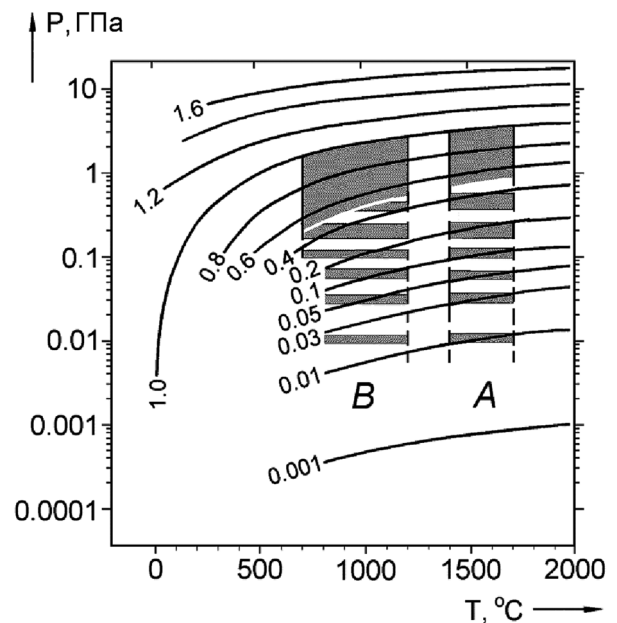


Рис. 6. Давления консервации плотных (~ 0.5 – 1 г/см³) водных включений (зоны сплошной штриховки) в лещательритах/высококремнеземных стеклах (А) и К-На полевошпатовых стеклах (В) на фазовой диаграмме воды по [16].

Кривыми линиями показаны изолинии плотности воды в г/см³. Прерывистой штриховкой показаны P - T параметры консервации водных включений с плотностью < 0.5 г/см³.

Такая разгрузка известна в ударных экспериментах на “влажных” системах [17], связана с действием водного буфера и уже предполагалась для расплавных импактитов Попигайской астроблемы [7]. Изучение импактных флюидизатов в этой астроблеме подтвердило гипотезу водного буфера и позволило оценить замедление ударной разгрузки “влажных” сред для указанных флюидизатов на период до 10–12 с [24]. Такое время уже достаточно для консервации высоко-барических водных включений в мономинеральных стеклах из самых различных импактитов астроблемы [4], в том числе из тагамитов описываемой мегабрекчии. Напомним, что среди попирайских расплавных импактитов, наряду с “сухими” разностями, широко распространена “влажная” серия пород, наличие которой согласуется с гипотезой водного буфера. Как уже отмечалось выше, “ранние” тагамиты обнажения “Пестрые Скалы” также относятся к “влажной” серии расплавных импактитов астроблемы (табл. 2) и содержат 1.14–3.49 мас. % H_2O со средним значением 2.45 ± 0.79 мас. %.

Согласно нашим прежним исследованиям, флюидно-расплавные смеси, давшие начало импактным флюидизатам, продуктам импактного анатексиса и другим водонасыщенным попирайским импактитам, были высокоподвижными продуктами [5, 24]. “Ранние” тагамиты из обнажения “Пестрые Скалы” также не составили исключения, на что указывает их положение в разрезе и характер контактов с кластическим материалом мегабрекчии, а также временной перерыв между отложением мегабрекчий и толщи “поздних” тагамитов. Из условий залегания “ранних” тагамитов следует, что они в опережающем режиме отделились от основной массы ударного расплава и внедрились в гнейсы зоны умеренного импактирования с образованием здесь турбулентных расплавно-обломочных смесей. Далее, в процессе экскавации, подвижные смеси обломков и расплава переместились в краевую часть растущего кратера, где и произошло отложение мегабрекчии. И только затем эта мегабрекчия была перекрыта потоками основной массы ударного расплава, давшего начало толще “поздних” тагамитов.

По аналогии с данными [5, 17, 24] по другим импактитам, высокая подвижность “ранних” тагамитовых расплавов была связана с их повышенным водосодержанием. Оно было унаследовано из диффундированных пород кристаллического фундамента мишени, определило опережающую экскавацию таких расплавов и ввело их в динамический контакт с умеренно-импактированными кластическими продуктами из краевой части растущего кратера. При этом “ранние” тагамитовые расплавы под действием водного буфера на некоторое время сохраняли остаточные ударные давления, достаточные для консервации плотных водных включений в тугоплавких мономинеральных стеклах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее уже отмечалась важная роль воды в особой специфике экскавации импактитов [17], ударной сепарации химических элементов [7, 23], а также в минералогенезе и петрогенезе этих пород [7]. Результаты настоящих исследований показывают, что вода в импактных процессах большого масштаба способствует появлению мобильных расплавных систем с высокой проникающей способностью и относительно “продолжительным” остаточным ударным давлением. Эта особенность флюидного режима импактитов должна учитываться в исследованиях астроблем на Земле, Марсе и других планетах, породы которых богаты водой и другими летучими компонентами.

Кроме того, рассмотренный пример опережающего движения “ранних” импактных расплавов еще раз показывает, что экскавационное течение при образовании больших импактных структур обладало сложными и высокоградиентными флуктуациями скорости выбросов, связанными с различными начальными параметрами мишени. Эти флуктуации не соответствуют так называемой Z-модели монотонного радиально-центростремительного кратерообразующего движения на выброс [19 и др.], которая применяется сейчас многими исследователями-“модельерами” при анализе импактных процессов. В этой связи, весьма показательны и другие парадоксы Попигайской астроблемы, такие как, например, образование импактных диатрем [2] или зювитовых мегабрекчий в этой структуре [3, 4, 23]; в обоих этих примерах речь идет о субвертикальной экскавации части материала выбросов в краевой зоне растущего кратера, связанной с приповерхностным отставанием фронта ударной волны в контрастном разрезе попирайской мишени (осадочный чехол и кристаллический фундамент). Такие выбросы нарушили принцип “обратной стратиграфии” в разрезе аллогенного выполнения астроблемы и послужили динамическим барьером на пути распространения высоко-импактированных продуктов, которые двигались из внутренней зоны кратера. Еще одним примером на данную тему является оригинальная и хорошо аргументированная гипотеза имплюзиона [9], которая показывает важную роль атмосферы в качестве динамического барьера и агента центростремительного движения по отношению к выбросам взрывного облака в импактных событиях большого масштаба. В заключение этого параграфа приведем мнение авторитетных американских исследователей В. Шарптона и Б. Дресслера [20], которые на примере канадской астроблемы Хафтон прямо указывают на то, что хотя Z-модель может быть и верна для лабораторных экспериментов, и даже для малых простых кратеров, но для сложных астроблем ни по-

ле скоростей движения материала при экскавации, ни форма возникающей воронки такой модели не соответствуют.

Проведенные исследования поддержаны грантом РФФИ № 08–05–00408.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вальтер А.А., Барчук И.Ф., Булкин В.С. и др. О вероятном составе Эльгыгитгынского метеорита // Письма в АЖ. 1982. № 2. С. 115–120.
2. Вишневецкий С.А. Краевая часть Попигайской астроблемы: импактные диатремы и горсты, новая интерпретация глубинного строения // Метеоритное вещество и Земля. Новосибирск: Наука, 1986. С. 131–159.
3. Вишневецкий С.А. Зювитовые мегабрекции – новый тип отложений взрывного облака Попигайской астроблемы. I. Общая характеристика. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1994. 66 с.
4. Вишневецкий С.А. Астроблемы. Новосибирск: “Нон-парель”, 2007. 288 с.
5. Вишневецкий С.А., Гибшер Н.А. Попигайская астроблема: высокобарические водные включения в мономинеральных стеклах как свидетельство замедленной разгрузки “влажных” ударно-сжатых сред // Мат-лы XIII Междунар. конф. по термобарогеохимии и IV Симпоз. PIFIS. Т. 1. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 197–200.
6. Вишневецкий С.А., Долгов Ю.А., Ковалева Л.Т. и др. Стишовит в породах Попигайской структуры // Геология и геофизика. 1975. № 10. С. 149–156.
7. Вишневецкий С.А., Поспелова Л.Н. Импактный анатексис в ударно-метаморфизованных гнейсах Попигайской астроблемы // Метеоритное вещество и Земля. Новосибирск: Наука, 1986. С. 117–131.
8. Вишневецкий С.А., Поспелова Л.Н. Флюидный режим импактитов: плотные водные включения в высококремнеземистых стеклах и их петрологическое значение. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1988. 53 с.
9. Данилин А.Н. Уточненная модель формирования импактного кратера на поверхности Земли // Уральский геологический журнал. 2009. № 4 (70). С. 89–91.
10. Масайтис В.Л., Мащак М.С., Селивановская Т.В. и др. Попигайская астроблема // Геология астроблем. Л.: Недра, 1980. С. 114–130.
11. Минералы. Справочник. Вып. I. Фазовые равновесия, важные для природного минералообразования. М.: Наука, 1974. 514 с.
12. Минералы. Справочник. Т. V. Вып. 1. М.: Наука, 2003. 583 с.
13. Розен О.М., Андреев В.П., Белов А.Н. и др. Архей Анабарского щита и проблемы ранней эволюции Земли. М.: Наука. 1988. 253 с.
14. Фельдман В.И., Сазонова Л.В., Козлов Е.А. Закономерности подвижности главных породообразующих элементов при ударном метаморфизме (по результатам экспериментов) // Докл. АН. 2003. Т. 393, № 6. С. 813–815.
15. Ясинская А.А., Калюжный В.А., Набатникова Т.Б. Включения в стеклах из метеоритного кратера Жаманшин // Докл. АН УССР. Сер. Б. 1981. № 9. С. 38–41.
16. Juza J., Sifler O., Mares R. Equation of state for ordinary water in the fluid state from the saturation line to the melting line at temperatures from –45 to 300°C and in the region from 0.1 to 20 GPa between 300 and 2000°C // Proceed. 10th Intern. Conf. Properties Steam. Moscow: Mir Publishing, 1986. P. 106–116.
17. Kieffer S.W., Simmonds C.H. The role of volatiles and lithology in the impact cratering process // Rev. Geophys. Space Phys. 1980. V. 18, № 1. P. 143–181.
18. Kozlov E.A., Zhugin Yu.A., Sazonova L.V. et al. Migration of chemical components of minerals under shock-wave loading of Janisjarvi astrobleme target rocks (Karelia, Russia) // 33th Lunar and Planetary Sci. Conf. Abstr. #1050. Houston: Lunar and Planetary Institute. 2002. Contrib. #1109. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2002/pdf/1050.pdf>.
19. Maxwell D.E. Simple Z-model of cratering, ejection and overturned flap // Impact and Explosion cratering. New York: Pergamon Press, 1977. P. 1003–1008.
20. Sharpton V.L., Dressler B.O. Excavation flow and central peak rings: is there a connection? Workshop on impact cratering: Bridging the gap between modeling and observations // 34-th Lunar and Planetary Sci. Conf. Abstr. #8059. Houston: Lunar and Planetary Institute. 2003. Contrib. #1155. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/publications/impact2003/pdf/8059.pdf>.
21. Stoffler D., Langenhorst F. Shock metamorphism in nature and experiment: basic observations and theory. Meteoritics. 1994. V. 29. P. 15–181.
22. Vishnevsky S.A., Gibsher N.A., Palchik N.A. H₂O+melt jets in the Popigai lechatelierites: products of shock-induced fluid+melt selective separation derived from the target gneisses // 40th Lunar and Planetary Science Conference. Abstract #1108. Houston: Lunar and Planetary Institute. 2009. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/1108.pdf>.
23. Vishnevsky S.A., Montanari A. Popigai impact structure (Arctic Siberia, Russia): geology, petrology, geochemistry and geochronology of glass-bearing impactites // Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II. Boulder, Colorado: Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 339. 1999. P. 19–59.
24. Vishnevsky S.A., Raitala J., Gibsher N.A. et al. The Popigai impact fluidizites. // 37th Lunar and Planetary Science Conf. Abstr. #1268. Houston: Lunar and Planetary Institute. 2006. Contrib. #1303. <http://lpi.usra.edu/meetings/lpsc2006/pdf/1268.pdf>.

Рецензент А.Н. Данилин

The Popigai megabreccia: The source and deposition peculiarities of “early” tagamites incorporated within

S. A. Vishnevsky, N. A. Gibsher, N. A. Palchik

Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS

The origin peculiarities of “early” tagamite inclusions from the Popigai megabreccia are considered. The tagamites are the gneiss-derived impact melt products from the margin of the Popigai shock melting zone (~14–15 km far from the center of the impact), which got in dynamic touch with the products of the fracturing and moderate shock metamorphic zone (~20 to ~30 km far from the center). The water content (2.15 ± 0.79 wt. % of H_2O) and the trace and minor elements spectra as well indicate that the Khapchan diaphthoresised stratum was a target source rock for the “early” tagamites. Dense ($0.5\text{--}1$ g/cm³), water fluid inclusions in the monomineral melt glasses from the “early” tagamites were trapped at high, ~0.2–0.7 to ~1.5–3.3 GPa, confining shock pressures, whose slow release was controlled by the action of water buffer. The studies performed show that the water in impact processes stimulates the origin of mobile melt systems with a high penetrating ability and a relatively “long-living” residual shock pressure. This particularity of fluid regime of impactites has to be taken into account at investigations of terrestrial, Martian and Other Planetary astroblemes, originated on water- and other volatile-rich targets.

Key words: *the Popigai astrobleme, megabreccia, “early” tagamites, fluid regime of impact melt rocks.*