

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 523.681.8:548.8:549.691.1:552.164 (571.511)

ИМПАКТНЫЕ ТУФФИЗИТЫ ПОПИГАЙСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ

С.А. Вишнеvский, Й. Райтала*, Н.А. Гибшер, Т. Охман*, Н.А. Пальчик

Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

* University of Oulu, POB 3000, FI-90014, Oulu, Finland

Приведено описание импактных туффизитов Попигайской астроблемы, которые как данный класс пород впервые выделяются в земных астроблемах. Их дайки в гнейсах мишени сложены смесью стекла (10—90 об.%), обломков гнейса и криптозернистого базиса. Частицы стекла в основном пористые, „сварены“ с базисом и замещены смектитом. Среди „свежих“ стекол выделены три типа: I — гомогенные апогнейсовые; II — гетерогенные с тонкополосчатым чередованием гомогенных (тип I), фемических и салических разновидностей; III — салические, в том числе апокварцевые с коэситом. Стекла содержат „тени“ минералов исходной породы, а также высокотемпературные минералы: шпильеры лешательерита и глобулы магнетита, самородного Fe, циркона, рутила (*T* плавления—разложения соответственно, °C: >1700, >1590, >1530, ~1800 и >1850). Низкие суммы содержаний главных петрогенных оксидов предполагают, что стекла богаты летучими (тип стекла/мас.% флюида): I/4-12; II/5-24; III/12-25, в том числе III/2-7 для апокварцевых стекол. Лешательерит содержит газово-жидкие флюидные включения. В случае их водного состава материал туффизитов при внедрении в гнейсы сохранял высокое остаточное ударное давление ~0,8—3,3 ГПа. В целом гиалиновый компонент туффизитов представлял апогнейсовые флюидно-расплавные смеси, которые возникли на внешнем рубеже зоны ударного плавления (*P* ~ 50—60 ГПа, ~14—15 км от центра взрыва) и внедрились в гнейсы из зоны слабого импактирования (*P* < 8—10 ГПа, >25—30 км от центра взрыва). В импактных туффизитах найдены первые в Попигайской астроблеме следы расплавов: карбонатного и предполагаемого гидратированного силикатного, возникших при ударном плавлении различных пород мишени.

Попигайская астроблема, импактные туффизиты.

IMPACT TUFFISITES OF THE POPIGAI ASTROBLEME

S.A. Vishnevsky, J. Raitala, N.A. Gibsher, T. Öhman, and N.A. Pal'chik

Impact tuffisites of the Popigai astrobleme are described. This class of rocks has first been discovered in terrestrial astroblemes. Their dikes in the target gneisses are made up of a mixture of glass (10–90 vol.%), gneiss fragments, and cryptograin matrix. Most of the glass particles are porous; they are “welded” with the matrix and are replaced by smectite. The fresh glasses are of three types: I – homogeneous, derived from gneisses, II – heterogeneous, with a fine-banded alternation of homogeneous (type I), “femic”, and “salic” varieties; III – “salic”, including coesite-bearing glasses derived from quartz. The glasses contain “shadows” of target rock minerals as well as high-temperature minerals: lechatelierite schlieren and globules of magnetite, native Fe, zircon, and rutile (melting/decomposition points, °C, are >1700, >1590, >1530, ~1800, and >1850, respectively). The low totals of major oxides suggest that the glasses are rich in volatiles (glass type — wt.% fluid): I — 4–12, II — 5–24, III — 12–25 (2–7 for glasses derived from quartz). Lechatelierite contains gas + liquid inclusions. In the case of water fluid, the inclusions evidence that the material of tuffisites was injected into gneisses at residual shock pressures (~0.8–3.3 GPa). Generally, the hyaline component of the tuffisites was a kind of volatile + melt mixtures derived from the target gneisses and originated at the outer margin of shock melting zone (*P* ~50–60 GPa, ~14–15 km from the center of explosion); the material intruded into gneisses from weak-shock metamorphism zone (*P* < 8–10 GPa, >25–30 km from the center of explosion). Traces of carbonate and supposedly hydrous silicate melts have been first found in the Popigai impact tuffisites. These melts resulted from the shock melting of different target lithologies.

Popigai astrobleme, impact tuffisites

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время внимание исследователей вновь стали привлекать *туффизиты*, которые возникают в земной коре при внедрении горячих флюидно-расплавных смесей с большим избыточным давлением [1—4]. Они известны уже давно [5—8 и др.], однако долгое время оставались за рамками

повседневной научной и практической геологии [3]. В связи со специфичностью туффизитов, ряд авторов предлагают выделять их даже в самостоятельный класс или тип пород [1, 2, 9]. Как оказалось, эндогенные туффизиты распространены довольно широко и кроме академического интереса имеют важное экономическое значение, поскольку с ними бывают связаны различные полезные ископаемые [3]. Исследование Попигайской [10, 11], а также других (Герновской [12] и Белиловской [13]) астроблем показало, что высокотемпературные внедрения флюидно-расплавных смесей с избыточным давлением возникают не только в эндогенных условиях, но и при импактном кратерообразовании. Интересно отметить, что еще в 1938—1942 гг. такие внедрения, как продукты эндогенной флюидизации горных пород, были описаны в астроблеме Садбери (Канада) [6], в то время считавшейся изверженным габброидным комплексом.

Продукты внедрения флюидно-расплавных смесей в гнейсах мишени из Попигайской астроблемы (ПА) мы описываем как дайки импактных туффизитов (ИТ) и впервые выделяем данный класс пород в земных астроблемах. Их предварительная характеристика сделана нами ранее [10, 11], а ниже сообщаются первые результаты детального минералого-петрографического изучения этих пород, которые обещают получение новых данных о поведении флюида в импактных процессах. Это поведение изучено пока слабо, и выяснение флюидного режима импактитов является одной из фундаментальных проблем петрологии. Кроме того, сравнение импактных туффизитов с эндогенными аналогами может быть интересно для геологов, занимающихся вопросами магматизма и металлогении.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кроме методов оптической микроскопии, для изучения ИТ ПА применен микрозондовый анализ (микрозонд Camebax в ИМП СО РАН, г. Новосибирск, с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) Kevex-Ray для качественного анализа элементов от F до U, и микрозонд Jeol JCHA-733 в Университете Оулу, Финляндия, с ЭДС Link AN10/85C для анализа элементов от Na до U), электронно-микроскопический анализ (сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Jeol-JSM-6400 в Университете Оулу, Финляндия, с ЭДС INCA для анализа элементов от C до U) и рентгеноструктурный анализ (диффрактометр ДРОН-5 с фильтрованным на Fe CuK_α -излучением при напряжении 40 кВ и токе в 30 мА, ОИГТМ СО РАН, г. Новосибирск), дополняемый методами отжига и напитки для диагностики смектитов и хлоритов. Основой работы послужили 120 микрозондовых анализов и 180 анализов на СЭМ.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ИМПАКТНЫХ ТУФФИЗИТОВ

Попигайская астроблема диаметром 100 км и возрастом ~35,7 млн лет находится на севере Сибири. Ее мишень включает архейский кристаллический фундамент и осадочный чехол из различных отложений: от верхнепротерозойских до меловых с добавлением ряда комплексов изверженных пород. Астроблема хорошо сохранилась и является сложной структурой с центральным и кольцевым поднятиями. Последнее диаметром 50 км образовано архейскими гнейсами и разделяет внутреннюю воронку кратера, выработанную в породах фундамента, и внешнюю зону приповерхностного срыва, выработанную в основном в осадочном чехле. Аллогенное выполнение кратера состоит из отложений центрбежного донного потока, материал которых в процессе экскавации воронки распространялся в виде плотных турбулентных струй (клиппеновые брекчии, мегабрекчии, туфовидные брекчии и тагамиты), и отложений взрывного облака (зювитов), материал которых двигался в виде баллистических выбросов. В целом аллогенное выполнение кратера обладает радиально-концентрической зональностью, хорошо выраженной в плане и

разрезе. Более подробные сведения об астроблеме и ее породах см. в [14—17] и ссылках в них.

Дайки импактных туффизитов найдены в глыбах архейских гнейсов из краевого пояса мегабрекчий по западному борту астроблемы (бассейн р. Саха-Юрэгэ, точки наблюдения (т.н.) 601, 2379-2381). Мегабрекчии представляют хаотическую смесь обломков различных пород мишени размером 1—100 м. Глыбы с дайками туффизитов имеют величину до 3—7 м, сложены однородными

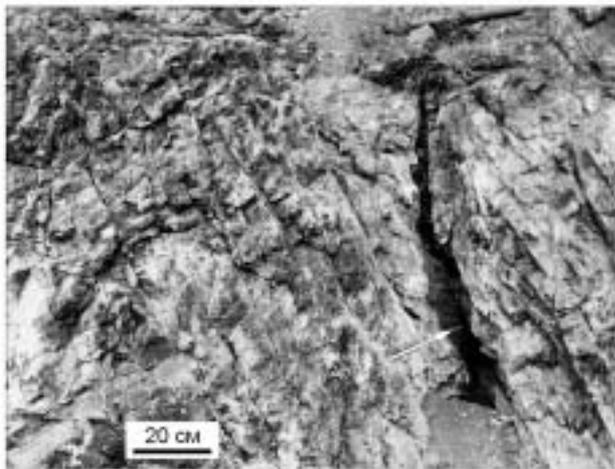


Рис. 1. Дайка импактных туффизитов (ИТ) (показана стрелкой) в глыбе раздробленных гнейсов из мегабрекчий Попигайской астроблемы (ПА).

Фрагмент обнажения 601.

или полосчатыми гнейсами и погружены в базис из несортированных псефитопсаммитовых продуктов дробления пород мишени с незначительной примесью частиц стекла, типичный для мегабрекчий астроблемы. Глыбы гнейсов сильно трещиноваты, катаклазированы и обычно превращены в агрегат угловатых, притертых друг к другу обломков, образованный хаотическим дроблением (текстуры мегагрис) или трещиноватостью нескольких систем. По зонам дислокаций часто развита милонитизация, и порода пересечена сетью тонких (от нескольких миллиметров до 1—2 см) различно ориентированных и ветвящихся прожилков темно-серого выветрелого милонита. Дайки импактных туффизитов мощностью от 1—1,5 до 10—12 см, также нередко ветвящиеся, с раздувами и пережимами, пронизывают породу в нескольких, подчас пересекающихся, направлениях, однако простирание их может совпадать с полосчатостью породы или с одной из систем ее трещиноватости (рис. 1).

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОБЩАЯ ПЕТРОГРАФИЯ ИМПАКТНЫХ ТУФФИЗИТОВ

Визуально эти породы темно-серые, умеренно или сильно литифицированы и выглядят как туфовидный агломерат преимущественно псаммитовидных (<5 мм) обломков пород мишени и частиц стекла. Текстура их обычно флюидальная (рис. 2, А). В ряде случаев дайки туффизитов оторочены тонкой (<1 см) прерывистой каймой выветрелого темного милонита, возникшего до внедрения даек или сопровождавшего их образование. По наблюдениям в шлифах, туффизиты сложены мелкими (от 1—3 до 20 мм) частицами стекла и обломками гнейса размером 0,05—20 мм (кварц, полевой шпат, пироксен, биотит, рудный и др. минералы), погруженными в криптозернистый базис. Обычно стекло доминирует, занимая до 85—90 % объема породы (см. рис. 2, Б—Е), но на некоторых участках пропорция стекла и продуктов дробления пород мишени широко варьирует, и на долю стекла приходится от 30 до 50 % объема породы; встречаются участки, где стекло занимает <10—15 % (см. рис. 2, А).

В основном частицы стекла сварены между собой и с другими компонентами породы и представляют флюидальные шлиры, часто со струйно-вихревой формой (см. рис. 2, А, 3, Б). Наряду со шлирами встречаются округлые частицы, которые были как бы окатаны в пластическом состоянии. В богатых расплавленным материалом зонах породы шлиры и окатанные частицы стекол сильнопористые, вплоть до пемзовидных разностей. В бедных этим материалом разностях (<10—30 % объема породы) частицы стекла обычно умеренно-пористые или массивные. Изредка во всех туффизитах встречаются настоящие обломки массивных или слабопористых флюидальных стекол (см. рис. 2, Д). Основная масса пористых стекол сильно изменена и почти целиком замещена криптозернистым зеленовато-желто-бурым агрегатом вторичных минералов, но следы пористости в них сохраняются. Другие шлиры, в основном среди массивных и умеренно-, слабопористых стекол, а также обломки стекол во всех типах туффизитов являются относительно „свежими“. В целом наиболее изменены стекла из богатых расплавленным материалом разностей породы, в то время как для разностей, обогащенных обломками гнейсов, более характерны свежие стекла. В некоторых стеклах содержатся флюидальные полосы обломков минералов гнейса, а в породе встречаются тонкие струйные массы милонита (см. рис. 2 Б, В). Вмещающие гнейсы и их обломки в составе туффизитов не несут петрографических следов ударного метаморфизма, исключая редкие и слабо выраженные ленты смятия в биотите. Кроме обломков гнейса в породе иногда отмечены мелкие (<5—7 мм) окатанные частицы чуждых микродолеритов (см. рис. 2, Е), захваченные извне при внедрении материала даек.

ПЕТРОГРАФИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СВЕЖИХ СТЕКОЛ

Гиалиновая компонента туффизитов изучалась по свежим участкам, которые частично сохранились в шлирах и обломках стекол; реже изучались полностью свежие частицы. Судя по свежим участкам, большинство частиц относительно однородны и представляют тип I — гомогенные зеленовато-желто-бурые стекла (см. рис. 3, А). Они содержат войлок игольчатых кристаллитов длиной до 10 мкм и толщиной <0,5—1 мкм. Реже встречаются гетерогенные частицы в основном свежих флюидальных тонкополосчатых стекол с чередованием светло- и темноокрашенных разностей, они выделены как тип II (см. рис. 3, Б—Г). Светлые полосы в них бесцветные, бледноокрашенные или зеленовато-желто-бурые (последние также содержат мельчайшие игольчатые микролиты). Кроме того, порода изредка содержит шлиры и обломки бесцветных или бледноокрашенных свежих стекол, которые мы выделяем как тип III — салические стекла (рис. 4). Все свежие стекла породы, за исключением апокарцевых (см. ниже), перлитизированы.

По химическому составу (табл. 1) стекла I типа сравнительно однородны и обладают низкой дисперсией содержаний главных петрогенных оксидов, что позволяет рассматривать их как смешанные гомогенные разности. Их средний состав близок расплавленным импактатам (стеклам зювитов, донных брекчий и тагамитов) астроблемы [15, 17], возникшим за счет ударного плавления гнейсов мишени. Однако в сравнении с ними стекла I типа имеют более низкие суммы оксидов (от 88,19 до 96,97 мас.%). Игольчатые микролиты, судя по их форме, а также по обогащенности Fe и Mg по отношению к стеклу, по-видимому, являются пироксеном, но из-за малого размера их точный состав не определен.

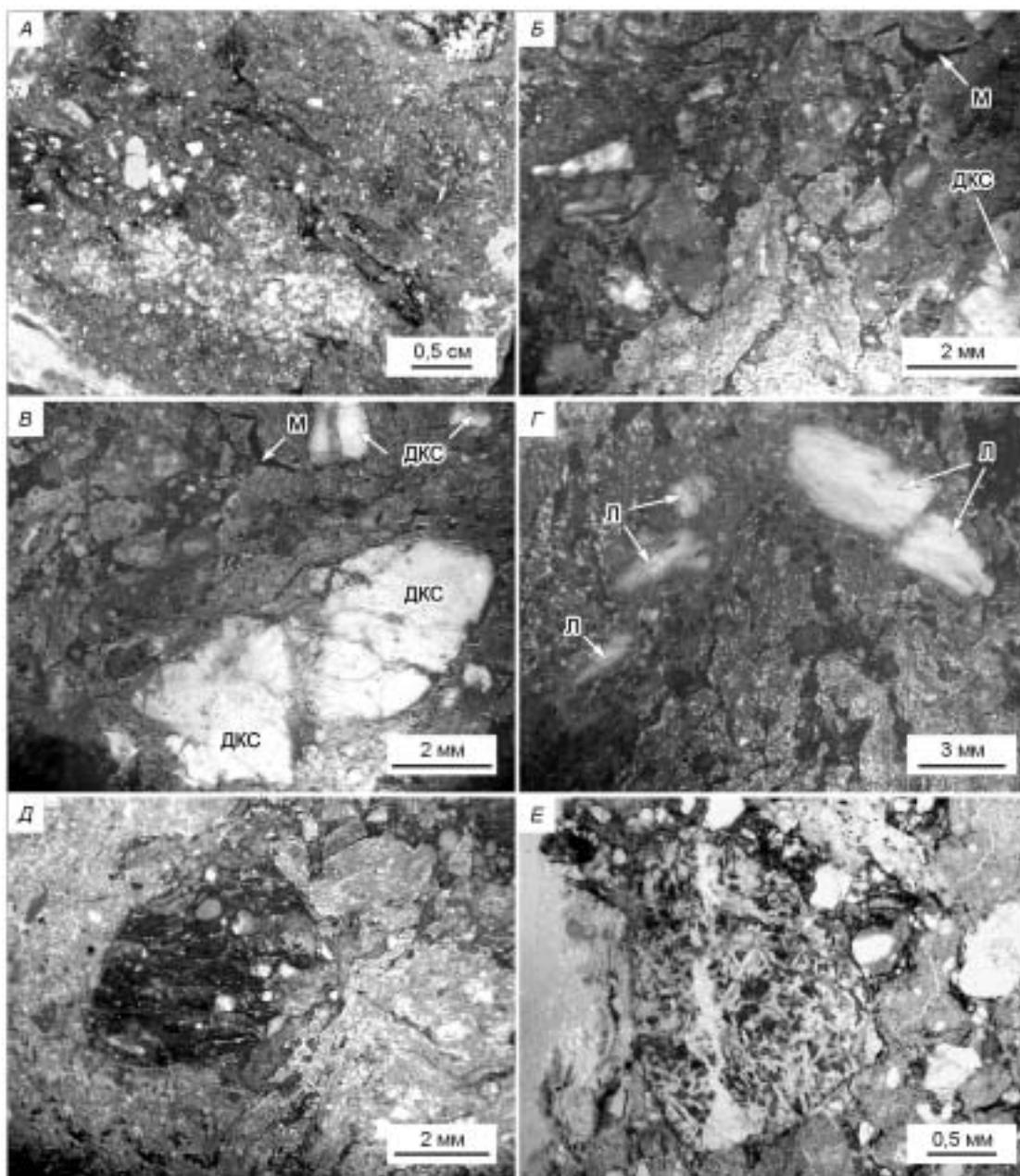


Рис. 2. Общая петрография ИТ ПА на примере даек т.н. 601.

А — бедная стеклом разность породы с флюидальной текстурой. Струйно-полосчатые шлиры свежего закаленного стекла (черное) с петлеобразными завихрениями, а также обломки гнейсов и их минералов (здесь и далее белое) в тонкообломочном базисе (серое); *Б* — богатая стеклом разность породы. Шлиры стекла (здесь и далее серое и светло-серое) сварены с тонкообломочным базисом (здесь и далее темно-серые интерстиции) и полностью изменены. Видна флюидальная полоса милонита (М) и обломки диаплектического кварцевого стекла (ДКС); *В* — та же пластинка со смещением: обломки коэзитсодержащего ДКС и флюидальная полоса М; *Г* — растащенный шпир лешательерита (Л) в богатой измененным стеклом породе; *Д* — полосчатый обломок закаленного стекла II типа (темно-серое в центре) в богатой измененным стеклом породе (частица 0504-5, составы стекол см. в табл. 2, ан. 6-10); *Е* — окатанный обломок микродолерита (в центре) в богатой измененным стеклом разности породы. Микрофотографии с боковым освещением; *А* — аншлиф, *Б–Е* — пластинки (в водной иммерсии).

Стекла II типа очень неоднородны (табл. 2). Их зеленовато-желто-бурые полосы по составу аналогичны смешанным стеклам I типа. Полосы полупросвечивающих буро-коричневых стекол обогащены FeO (7,38—13,33 мас.%), MgO (4,52—8,41 мас.%) и иногда — CaO (до 5,59 мас.%); содержание SiO₂ снижено (45,51—54,59 мас.%), а Al₂O₃ (12,69—17,89 мас.%), Na₂O (от <0,01 до 1,45 мас.%) и K₂O (1,35—4,07 мас.%) широко варьирует. Эти фемические стекла возникли при ударном плавлении и частичной

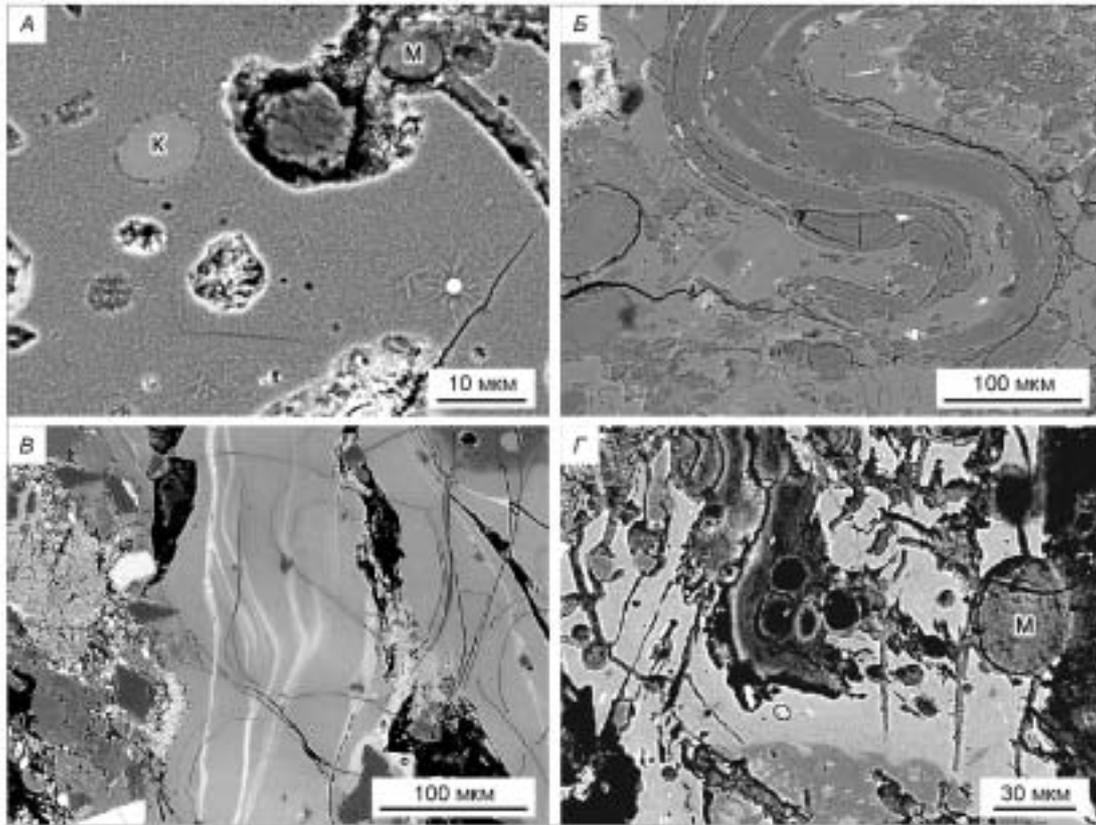


Рис. 3. Стекла I и II типа в ИТ ПА, т.н. 601.

A — частично измененное стекло I типа с войлоком микролитов пироксена, глобулами кальцита (К, состав см. в табл. 5, ан. 2) и монтмориллонита (М); внизу справа — сферула пентландита (23,49 мас.% Ni) с короной микролитов пироксена. Шлир 1604-2; *B* — полосчатое стекло II типа с вихревой флюидальной текстурой, сложенное чередованием стекол I типа (серое) и К-Na-Ca стекл (более темное). Шлир 1604-11/12 (составы стекол см. в табл. 2, ан. 25—30); *B* — стекло II типа с флюидальным тонкополосчатым чередованием стекол I типа (серое) и феррических стекол (светло-серые полосы). Частица 0504-12 (составы стекол см. в табл. 2, ан. 26—30); *Г* — частично измененное стекло II типа, сложенное гомогенной (серое) и К-Na (темно-серое внизу) разностями с волнистым контактом. Остальное — продукты изменения и глобула монтмориллонита (М). Частица 0604-18 (составы стекол см. в табл. 2, ан. 54, 55). СЭМ, изображения в обратнорассеянных электронах.

Таблица 1. Химический состав (мас.%) стекол I типа в попигайских туффизитах по данным 70 микрозондовых анализов

Оксид	Среднее содержание	Дисперсия ($\pm 2\sigma$)	Диапазон колебаний	Тагамиты, по [15]*
SiO ₂	59,7	1,42	55,2—67,82	63,13
TiO ₂	0,79	0,03	0,71—0,88	0,76
Al ₂ O ₃	16,12	0,51	13,21—16,76	14,68
FeO	6,23	0,29	4,78—7,15	6,76
MgO	3,82	0,16	3,08—4,46	3,82
CaO	2,9	0,15	2,14—3,26	3,43
MnO	0,07	0,02	0,03—0,16	0,08
Na ₂ O	1,46	0,28	0,74—2,39	1,96
K ₂ O	2,72	0,25	1,64—3,09	2,72
P ₂ O ₅	0,11	0,01	0,08—0,14	Не опр.
Cr ₂ O ₃	0,02	0,015	<0,002—0,06	»
Сумма	93,94	1,21	88,19—96,97	97,34

Примечание. Микрозонд Camebax, напряжение 20 кВ, ток 20 нА (ИМП СО РАН, г. Новосибирск, аналитик Л.Н. Поспелова). Все железо пересчитано на FeO.

* Средний состав тагамитов Попигайской астроблемы: данные влажных химических анализов, без воды и потерь при прокаливании.

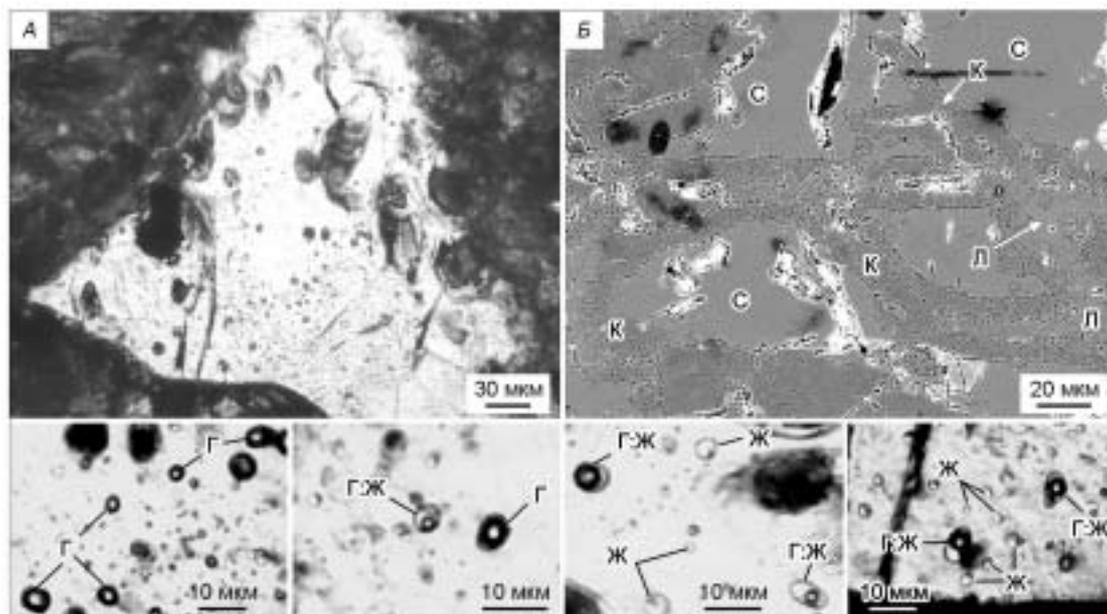


Рис. 4. Апокварцевые стекла III типа в ИТ ПА, т.н. 601.

А — шпир лешательерита с флюидными включениями различной плотности в контакте с аргиллизированным апогнейсовым стеклом. Внизу — увеличенные фрагменты этого шпира с существенно газовыми (Г), газовой-жидкими различной плотности (Г:Ж) и существенно жидкими (Ж) флюидными включениями. Микрофотоснимок в проходящем свете; *Б* — фрагмент обломка диаплектического кварцевого стекла (С) с линейными и почковидными агрегатами коэсита (К); в осевой зоне некоторых агрегатов коэсита содержатся полосы лешательерита (Л). СЭМ, изображение в обратнорассеянных электронах.

гомогенизации различных цветных минералов пород мишени. Аналогичные Mg-Fe разности таких стекол уже описаны в зювитах астроблемы [18]. Бесцветные и бледно-зеленовато-желтые полосы не содержат MgO и TiO₂, в них нет FeO и CaO или их количество низкое (<0,01—2,17 и <0,01—1,34 мас.% соответственно), но имеются заметные содержания Na₂O (1,68—3,26 мас.%) и K₂O (2,2—3,53 мас.%), по которым выделяются K-Na и K-Na-Ca разности. Эти салические стекла представляют продукт плавления и неполной гомогенизации в основном полевошпатовой части мишени. Суммы содержаний оксидов в стеклах II типа составляют от 76,21 до 95,54 мас.%.

Стекла III типа разнообразны по составу (табл. 3). Часть их подобна разностям стекол II типа, возникшим по полевошпатовой части мишени. Среди них выделяются K-Na, K-Na-Ca и даже чисто K-разности, полностью отвечающие составу калишпата (в пересчете сумм оксидов на 100 %). Калишпатовые стекла образуют мелкие включения в K-Na стекле. Суммы содержаний оксидов в апошпатовых стеклах III типа низкие: 74,87—88,11 мас.%. Другие стекла III типа образуют бледно-зеленоватые шпир с высоким содержанием SiO₂ (70,59—88,63 мас.%), но с почти полным набором остальных оксидов, и подобны высококремнеземистым разностям, известным в зювитах астроблемы [19]. Часть флюидальных бесцветных стекол с розоватым дисперсионным эффектом на границе представляет лешательерит (от 96,13 до 98,05 мас.% SiO₂). Некоторые его шпир раздроблены и растащены (см. рис. 2, Г). В лешательерите содержатся флюидные включения, в том числе газовой-жидкие и всецело жидкие при 20 °C (см. рис. 4, А). Такие же включения в богатых SiO₂ стеклах из зювитов астроблемы имели водный состав [19]. Кроме лешательерита в ИТ встречаются обломки бесцветного и изотропного диаплектического кварцевого стекла (ДКС) с розоватым дисперсионным эффектом на своих границах и содержанием SiO₂ до 97,89 мас.% (см. рис. 2, Б, В). В некоторых ДКС и лешательеритах найден коэсит. В ДКС он образует линейные и почковидные тонкозернистые агрегаты (см. рис. 4, Б), подобные выделениям коэсита в других импактитах (см., например [20]). Коэсит подтвержден дебаграммой одного из обломков ДКС, где наряду со стеклом (широкий рефлекс аморфной фазы в области углов отражения 15—37° CuK_α), кварцем и следами кристобалита есть его главные рефлексы (d_{α} , нм/л, %): 0,3426/22; 0,3106/37; 0,2766/9; 0,2704/8; 0,1795/2 и 0,1716/3. Кроме того, характерным признаком коэсита, который наблюдался в стеклах туффзитов астроблемы и отличает этот минерал от других фаз SiO₂ (см. рис. 4, Б), является его синяя люминесценция в электронном пучке микрозонда, в то время как кварц обладает красным свечением, ДКС — бледно-розовым, а лешательерит не люминесцирует. Суммы содержаний оксидов в высококремнеземистых и апокварцевых стеклах составляют 93,1—98,31 мас.%.

Таблица 2. Химический состав (мас.%) стекол II типа в попигайских туффизитах

Частица стекла	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Вид сосуществующих стекол
601-Б	6*	62,42	0,67	14,51	5,28	3,32	2,7	0,02	1,78	2,8	93,5	Гомогенное
	7*	61,93	0,74	14,85	5,45	3,42	2,48	0,08	1,49	2,81	93,25	»
	9*	64,16	0,67	14,74	5,54	3,3	2,38	0,06	0,54	2,21	93,6	»
	8*	60,13	1,16	15,96	7,94	4,52	2,85	0,14	0,64	2,2	95,54	Фемическое
	10*	59,86	0,87	15,09	7,38	4,8	2,64	0,1	0,41	2,08	93,23	»
0504-5	6	56,44	0,49	15,38	5,85	3,15	2,87	<0,01	1,38	2,52	88,08	Гомогенное
	7	58,9	0,79	13,77	5,63	2,81	2,47	<0,01	1,26	2,42	88,05	»
	9	57,71	1,02	14,11	5,45	3,07	2,5	<0,01	0,69	2,26	86,81	»
	8	48,4	1,29	15,21	12,91	7,31	3,04	<0,01	1,23	1,35	90,74	Фемическое
	10	48,31	1,24	14,87	12,22	7,39	3,39	<0,01	1,45	1,51	90,38	»
0504-12	26	58,09	1,04	13,66	5,91	2,85	2,57	<0,01	1,42	2,73	88,27	Гомогенное
	28	59,5	0,64	13,94	5,11	3,07	3,52	<0,01	1,46	2,71	89,95	»
	30	58,37	0,83	14,09	5,85	3,22	2,37	<0,01	0,94	2,5	88,17	»
	27	52,77	0,66	10,47	13,33	8,41	3,17	<0,01	0,71	1,48	91	Фемическое
	29	54,59	0,66	12,69	9,64	5,5	5,59	<0,01	1,14	1,58	91,39	»
0604-18	54	56,38	0,89	15,27	6,19	3,55	2,78	<0,01	1,07	2,03	88,16	Гомогенное
	55	61,34	<0,01	17,82	<0,01	<0,01	0,63	<0,01	3,26	3,53	86,58	Салическое К-Na
1604-11/12	25	50,43	0,96	14,77	6,4	2,74	1,66	<0,01	1,64	1,93	80,53	Гомогенное
	28	51,09	0,91	15,07	6,03	3,4	2,54	<0,01	1,41	1,53	81,98	»
	29	51,5	0,87	14,41	6,27	3,45	2,82	<0,01	1,16	2,55	83,03	»
	26	52,59	<0,01	16,4	2,17	<0,01	1,17	<0,01	1,68	2,2	76,21	Салическое К-Na-Ca
	27	56,83	<0,01	17,44	0,85	<0,01	1,09	<0,01	3,08	3,01	82,3	»
	30	57,04	<0,01	16	<0,01	<0,01	1,34	<0,01	2,61	2,39	79,38	»
1904-1/3	2	45,51	1,07	17,89	11,05	5,07	2,39	<0,01	<0,01	4,07	87,05	Фемическое
	5	56,51	<0,01	16,68	<0,01	<0,01	0,6	<0,01	2,79	2,49	79,07	»
1904-7/10	32	56,68	<0,01	16,83	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	3,02	2,91	79,44	Салическое К-Na
	42	57,6	<0,01	16,66	<0,01	<0,01	0,64	<0,01	2,53	2,56	79,99	»
	43	52,42	0,69	15,6	5,01	3,66	1,13	<0,01	<0,01	2,08	80,59	Гомогенное
1904-11	46	54,6	0,77	16,59	5,62	3,22	2,48	<0,01	1,45	3,04	87,77	Гомогенное**

* Анализы выполнены на микрозонде Jeol JСХА-733, ток 15 нА, остальные — на СЭМ Jeol-JSM-6400 в Университете Оулу в режиме определения всех элементов, напряжение 15 кВ.

** Полосы фемического стекла в этой частице не анализировались.

РУДНЫЕ МИНЕРАЛЫ И НЕКОТОРЫЕ АКЦЕССОРИИ

Стекла, особенно II и III типа, часто содержат флюидалные, округлые и обломковидные „тени“ минералов пород мишени, подвергшихся ударному плавлению—разложению и частичной гомогенизации с образованием кристаллитов новой генерации (рис. 5). Ниже приведен ряд примеров.

Тени рутила в частице 0504-7/9 высококремнеземистого стекла сложены идиоморфными микролитами TiO₂ величиной 3—7 мкм (табл. 4, ан. 11 и 13) в ассоциации со шлирами величиной 10—30 мкм бескальциевого высокоглиноземистого Mg-Fe стекла (ан. 15,16 там же), обогащенного Ti и частично раскристаллизованного.

Обломковидная тень разложенного сфена(?) (частица 0504-10/11 в стекле II типа) сложена решеткой мелких (3—5 мкм) призматических зерен TiO₂, в которых, судя по составу (см. табл. 4, ан. 21, 22), имеется то или иное количество Si-Al-Ca-содержащих включений. Промежутки между зернами TiO₂ заполнены Ca-содержащим высокотитанистым материалом переменного состава, который, возможно, представляет не только стекло (ан. 24 там же), но и какие-то минеральные фазы (ан. 25 там же).

В частице 1904-11 стекла II типа (см. рис. 5) тени граната(?) (судя по высоким содержаниям Al, Fe и Mg в продуктах раскристаллизации) сложены округлыми агрегатами мельчайших (<3 мкм) шестоватых кристаллитов высокоглиноземистого Mg-Fe пироксена(?) с K₂O и аномально низким содержанием SiO₂ (см. табл. 4, ан. 45). Среди продуктов ударного разложения гранатов в астроблеме ранее были описаны

Таблица 3. Химический состав (мас.%) стекол III типа в попигайских туффизитах

Частица стекла	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Сумма	Вид стекла
1604-5	13*	51,89	<0,01	15,87	<0,01	<0,01	2,7	<0,01	2,14	2,27	<0,01	<0,01	74,87	К-Na-Са стекло
1904-16н	16*	56,01	<0,01	16,8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	3,33	2,75	<0,01	<0,01	78,89	К-Na стекло
	13*	57,32	<0,01	16,98	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	13,81	<0,01	<0,01	88,11	Апокалишпатовое
1904-5	25*	55,97	<0,01	17,4	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	12,84	<0,01	<0,01	86,21	»
	26*	55,18	<0,01	16,57	<0,01	<0,01	0,46	<0,01	2,92	2,63	<0,01	<0,01	77,76	К-Na стекло
1904-26н	30*	56,31	<0,01	16,74	<0,01	<0,01	0,73	<0,01	3,27	2,77	<0,01	<0,01	79,82	»
601-24	24	67,82	0,77	13,21	4,78	3,08	2,14	0,04	0,95	2,56	0,09	<0,01	95,44	Высококремнеземистое
601-26	26	70,59	0,87	10,26	4,08	1,99	1,46	0,05	1,27	2,52	0,03	0,02	93,14	»
601-28	28	88,63	1,16	1,48	1,98	1,12	0,74	<0,01	0,61	1,19	0,04	<0,01	96,95	»
601-35	35	78,87	0,31	6,61	2,46	1,33	0,79	0,02	0,88	1,82	<0,01	0,01	93,1	»
601-А	1	96,13	0,13	0,1	0,26	0,24	0,18	<0,01	0,02	0,09	<0,01	<0,01	97,15	Лешательерит
	2	96,12	0,21	0,19	0,37	0,26	0,22	<0,01	0,08	0,17	<0,01	0,01	97,63	»
	3	97,41	0,03	0,07	0,04	0,02	0,01	<0,01	0,03	0,03	<0,01	<0,01	97,64	»
	4	96,35	0,16	0,18	0,24	0,23	0,19	<0,01	0,09	0,13	<0,01	<0,01	97,57	»
	5	97,24	0,09	0,02	0,06	0,02	0,03	<0,01	0,01	0,05	<0,01	0,01	97,53	»
601-Г	21	98,05	0,01	<0,01	0,03	0,01	0,01	<0,01	0,07	0,13	<0,01	<0,01	98,31	»
	22	97,75	0,03	0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,12	<0,01	0,01	97,97	»
601-В	32	97,42	0,02	0,02	<0,01	0,01	<0,01	0,03	0,04	0,03	<0,01	<0,01	97,57	Диалектическое кварцевое
	33	97,73	0,02	0,02	0,01	<0,01	0,02	0,01	0,03	0,04	<0,01	0,01	97,89	»

* Анализы выполнены на СЭМ Jeol-JSM-6400 в Университете Оулу, в режиме определения всех элементов, напряжение 15 кВ (остальные — на микрозонде Camebax в ИМП СО РАН, напряжение 20 кВ, ток 20 нА, аналитик Л.Н. Поспелова).

тонкозернистые сростания оливина с кордиеритом [21] или высокоглиноземистого (до 9—12 мас.% Al₂O₃) пироксена с герцинитом, сопровождавшиеся привнесом К и Na [22].

В частице 1904-7/10 стекла II типа (рис. 6, Г) тени фемического минерала сложены агрегатами мелких (1—3 мкм) кристаллитов высокоглиноземистого бескальциевого пироксена (см. табл. 4, ан. 36, 37) с редкими зернами TiO₂ (ан. 33 там же) и титанистым стеклом с заметным количеством K₂O и Na₂O (ан. 38, 39 там же). Составы стекол самой частицы приведены в табл. 2 (ан. 32, 42, 43).

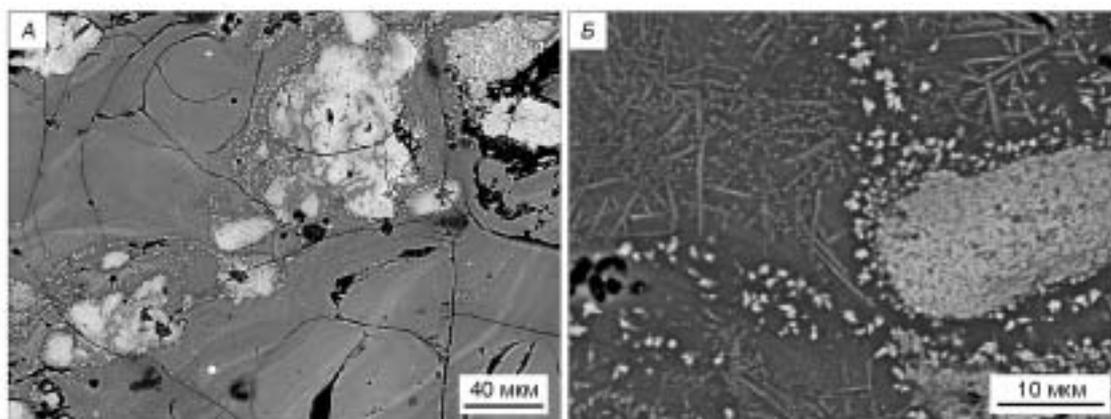


Рис. 5. Тени фемических минералов в стеклах ИТ ПА.

А — фрагмент частицы 1904-11 свежего стекла II типа с флюидальным чередованием тонких полос фемического (серые полосы) и гомогенного (более темные участки) составов. Стекло содержит округлые или обломковидные тени фемических минералов, сложенные густыми скоплениями микролитов пироксена(?) (светло-серые участки), и перлитизировано; Б — увеличенный фрагмент центральной части А: округлая тень из микролитов пироксена(?) окружена нечетко выраженной короной пироксенов другой генерации (см. табл. 4, ан. 44, 45). Вмещающее гомогенное стекло (см. табл. 2, ан. 46) содержит скелетно-игольчатые трихиты пироксена еще одной генерации (т.н. 601, СЭМ, изображения в обратнорассеянных электронах).

Таблица 4. Химический состав (мас.%) продуктов разложения фемических минералов гнейсов и продуктов их кристаллизации в стеклах попигайских туффзитов

Частица стекла	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	V ₂ O ₅	Сумма	Примечание
0504-7/9	11	2,65	95,55	1,30	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	99,5	Микролит TiO ₂
	13	2,31	97,24	1,13	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,19	<0,01	100,87	»
	15	43,98	9,43	23,34	5,26	5,4	<0,01	1,07	1,23	<0,01	89,71	Сопровождающее стекло
	16	43,12	4,02	29,43	7,23	7,3	<0,01	1,00	1,01	<0,01	93,11	»
	18	38,54	1,97	9,92	17,64	25,63	0,7	0,46	0,65	<0,01	95,51	Микролит Pх из короны
	19	40,08	0,91	11,08	19,88	25,98	0,9	0,49	0,66	<0,01	99,98	»
0504-10/11	21	5,99	83,43	1,10	2,85	1,51	5,50	<0,01	<0,01	<0,01	100,38	Микролит TiO ₂
	22	2,14	94,16	<0,01	<0,01	<0,01	2,10	<0,01	<0,01	1,32	99,72	»
	24	47,21	44,35	0,83	0,73	0,42	1,10	<0,01	<0,01	<0,01	94,64	Заполнение интерстиций
	25	42,56	27,96	7,28	2,50	2,71	7,90	0,96	0,42	<0,01	92,29	»
1904-7/10	33	2,57	85,78	1,02	4,39	1,68	<0,01	<0,01	<0,01	2,05	97,49	Микролит TiO ₂
	36	37,94	3,07	12,08	17,22	21,78	<0,01	<0,01	1,04	0,05	93,18	Микролит Mg-Fe Pх
	37	41,99	2,67	12,83	14,99	19,04	<0,01	<0,01	1,21	<0,01	92,73	»
	38	41,84	4,96	15,59	5,18	4,07	0,50	1,59	1,93	<0,01	75,66	Остаточное стекло базиса
	39	44,38	4,89	16,84	5,39	4,30	<0,01	2,18	1,96	<0,01	79,94	»
1904-11	45	29,43	<0,01	18,22	24,82	17,58	0,50	<0,01	0,74	<0,01	91,29	Микролит Pх(?) из тени
	44	48,30	0,66	15,18	16,36	10,97	1,70	1,32	2,11	<0,01	96,60	Микролит Pх из короны

Примечание. Анализы выполнены на СЭМ Jeol-JSM-6400 в Университете Оулу в режиме определения всех элементов, напряжение 15 кВ. Pх – пироксен.

Тени минералов и включения высококремнеземистого стекла часто окружены реакционной короной кристаллитов Mg-Fe пироксена (см. рис. 5, Б), составы которых см. в табл. 4 (ан. 0504-7/9-18, 19 и 1904-11-44). Высокие содержания Al₂O₃ присущи пироксенам в стеклах разных астроблем, включая Попигайскую [22—25]. Низкие суммы анализов некоторых пироксенов (см. табл. 4) связаны с их малыми размерами и влиянием вмещающего стекла. Примеси Na и K в остаточном стекле теней указывают на микродиффузию этих элементов в процессе ударного плавления—разложения и перекристаллизации фемических минералов. Вероятно, она происходила с участием высокоподвижной флюидной фазы. Эту гипотезу подтверждают данные [21] по импактному анатексису гнейсов Попигайской астроблемы, который протекал с появлением мобильной, богатой Si, K и летучими (H₂O + CO₂) фазы, и данные [22], предполагающие миграцию K и Na вместе с мобильной флюидной фазой при ударной перекристаллизации гранатов в импактиках этой структуры.

В стеклах туффзитов найдены сферулы мартитизированного магнетита величиной до 30—50 мкм (см. рис. 6, А), определенные по магнитности, серому цвету в аншлифах и составу (данные электронного микросондирования, мас. %: FeO + Fe₂O₃ = 91,69 в пересчете на магнетит от Fe = 66,39, Cr₂O₃ = 0,53, MnO = 0,94, сумма 93,16; даже в пересчете на гематит эта сумма составит 96,31, что указывает на замещение магнетита с участием гидрогематита).

В калийсодержащем фемическом стекле гетерогенной частицы 1904-1/3 (составы стекол см. в табл. 2, ан. 2, 5) найдены сферулы самородного никелистого Fe величиной 0,4—2,3 мкм (см. рис. 6, Б). Состав самой крупной из них следующий (СЭМ, мас. %): Fe—90,76; Ni—1,44; сумма—92,2. В этом же стекле содержатся идиоморфные кристаллики плеонаста величиной от 1 до 3 мкм. Состав наибольшего из них следующий (СЭМ, мас. %): FeO—21,03; MgO—11,69; Al₂O₃—55,17; SiO₂—6,51; K₂O—0,36, сумма—94,76 (Si, K и Ca, не типичные для шпинели, были, по-видимому, захвачены зондом из вмещающего стекла).

В стеклах туффзитов найдены продукты плавления—разложения циркона в виде мелких (8—35 мкм) сферул. Состав одной из них (см. рис. 6, В) (СЭМ, сканирование по площади 7 × 8 мкм, мас. %: SiO₂—30,81, CaO—0,97, FeO—1,02, ZrO₂—66,71, сумма—99,51) отвечает ZrSiO₄ с примесями Fe и Ca. В самом крупном (диаметр 1,6 мкм) капельном включении из этой сферулы обнаружены MgO, Al₂O₃, SiO₂, CaO,

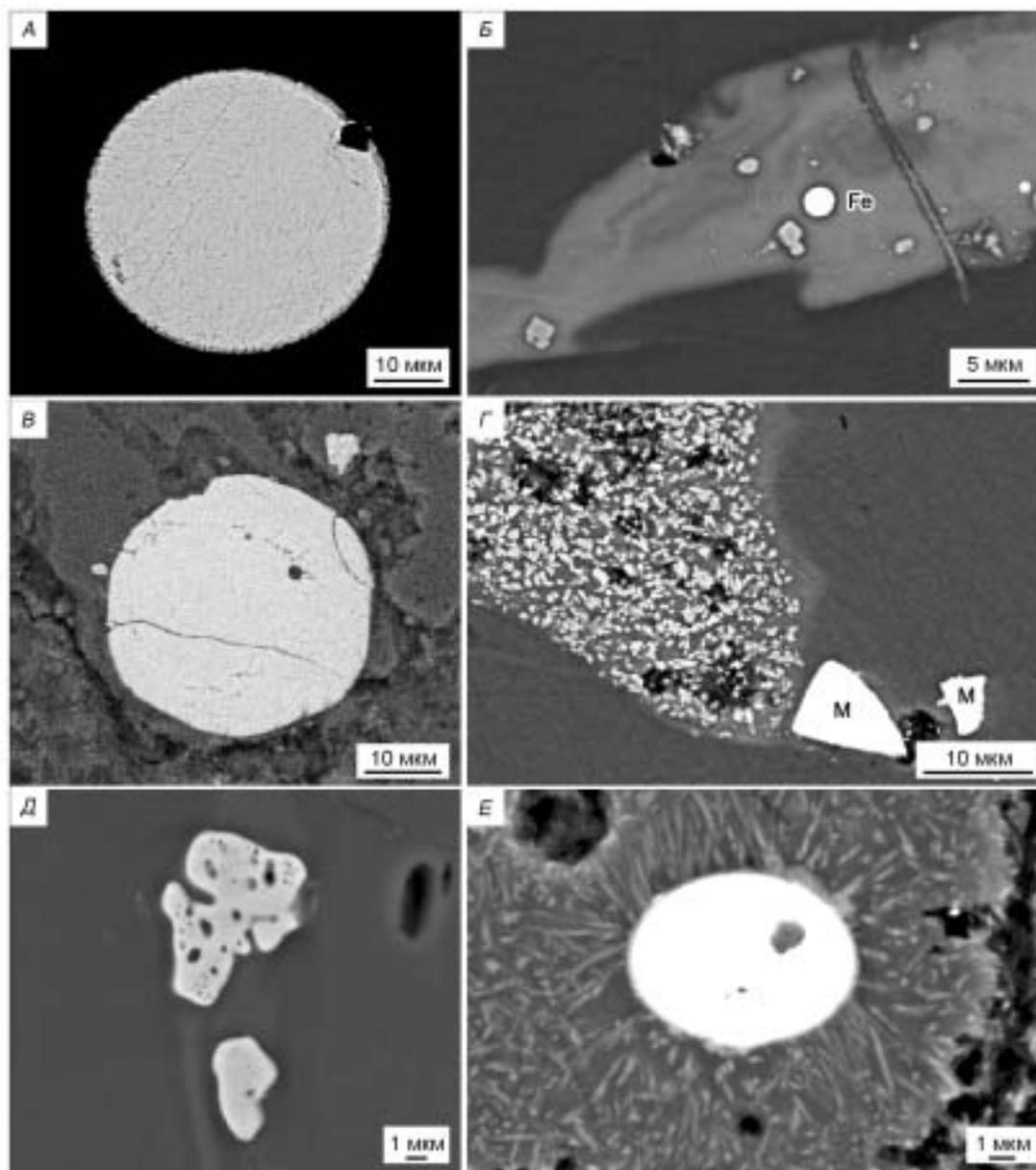


Рис. 6. Некоторые акцессории в стеклах ИТ ПА.

А — сфера мартитизированного магнетита в эпоксидной смоле (микроаншлиф); *Б* — сфера самородного никелистого железа (Fe) и зональные кристаллики плеонаста в феррическом стекле II типа (светло-серое) из частицы 1904-1/3. Темные поля сверху и снизу сложены К-Na салическим стеклом; *В* — сфера продуктов ударного плавления—разложения циркона с тонкой эмульсионной структурой и каплями расплавленных включений. Частица 0504-2/4 аргиллизированного стекла; *Г* — зерна монацита (М) и тень феррического минерала, сложенная агрегатом кристалликов пироксена в остаточном стекле (серое). Остальное — К-Na салическое стекло (более темное). Частица 1904-7/10 стекла II типа; *Д* — зерна оплавленного рутила в К-Na-Са салическом стекле. Рутил содержит поры и эмульсию капелек вмещающего стекла или расплавленных включений. Частица 1604-11/12 гетерогенного стекла; *Е* — глобула FeS с порой и короной микролитов пироксена в шпире частично измененного стекла I типа 0604-13 (т.н. 601, СЭМ, изображения в обратнорассеянных электронах). Составы акцессориев и вмещающих стекол приведены в тексте.

FeO и ZrO₂. С вычетом компонентов вмещающего циркона и пересчетом на 100 %, валовой состав этого включения (в мас. %: MgO—6,14, Al₂O₃—17,90, SiO₂—51,09, CaO—3,98 и FeO—20,89) отвечает пиропальмандину с избытком Si, который заимствован из минерала-хозяина.

В гетерогенном стекле частицы 1904-7/10 (составы полос см. в табл. 2) найден монацит (Ce, La, Nd, Th, Ca...; PO₄, SiO₂...) (см. рис. 6, Г), определенный по составу (СЭМ, мас. %): левое зерно на рисунке — Ce₂O₃—26,31, La₂O₃—11,32, Nd₂O₃—11,12, Th₂O₃—6,08, CaO—1,22, SiO₂—1,67, P₂O₅—24,78, сумма—82,5; правое зерно — Ce₂O₃—27,1, La₂O₃—15,38, Nd₂O₃—9,53, CaO—0,94, AgO—2,43, P₂O₅—26,2,

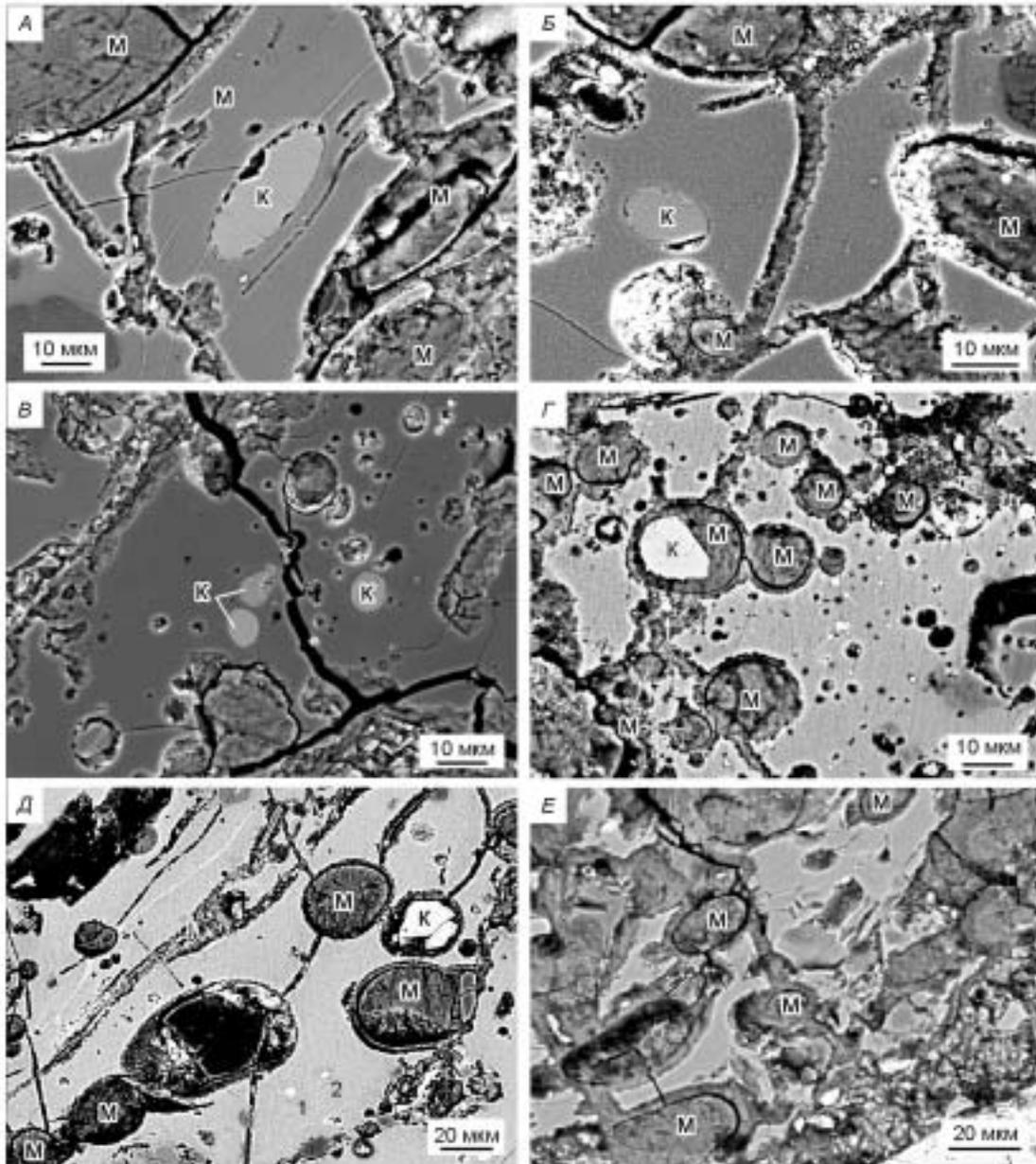


Рис. 7. Глобулы кальцита (К) и монтмориллонита (М) в стеклах ИТ ПА с текстурными признаками несмесимости исходных расплавов (т.н. 601, СЭМ, изображения в обратнорассеянных электронах).

А — глобула К (см. табл. 5, ан. 35, 36) имеет тонкую прерывистую оторочку монтмориллонита(?). Глобулы М хорошо выделяются в зоне сплошного изменения вмещающего стекла (справа) по оконтуривающим трещинам (усадки?). В свежем стекле (слева сверху) глобула М (см. табл. 6, ан. 39) окружена каймой аргиллизации. Шлир 1604-14 флюидального частично измененного стекла II типа; *Б* — глобула К (см. табл. 6, ан. 7) почти не имеет оторочки монтмориллонита(?). Глобулы М оконтурены трещиной (усадки?) и частично развитой каймой аргиллизации вмещающего стекла. Шлир 1604-4 частично измененного стекла I типа; *В* — глобулы К (состав справа налево, см. в табл. 5, ан. 9—11) не имеют оторочки монтмориллонита(?), а центральная из них образована слиянием нескольких капель карбонатного расплава. Шлир 1604-5 частично измененного К-Na-Ca стекла III типа (см. табл. 3, ан. 13); *Г* — глобулы М (см. табл. 6, ан. 17—19) оконтурены трещинами (усадки?) и каймами аргиллизации вмещающего стекла. Глобула слева от центра содержит кристаллик кальцита (К) (см. табл. 5, ан. 16). Стрелками показаны сферулы FeS (от <0,01 до 1,31 мас.% Ni). Шлир 1304-7 частично измененного стекла I типа; *Д* — глобулы М (см. табл. 6, ан. 9, 10, 12) оконтурены трещинами (усадки?) и каймой аргиллизации вмещающего стекла. Глобула справа содержит кристаллики кальцита (К) (см. табл. 5, ан. 11). Контуры этого и двух соседних глобул М были взаимно деформированы на стадии жидкого состояния всех трех капель и вмещающего стекла. В центре внизу — крупная миндалина зонального строения. Справа от нее — две глобулы пентландита (1 и 2, см. текст) с короной микролитов пироксена. Шлир 1304-2/4 частично измененного стекла I типа; *Е* — глобулы М выделяются по трещине (усадки?) и частично сохраненной кайме аргиллизации вмещающего стекла. Шлир 0604-19/20 сильно измененного стекла I типа.

сумма—81,58. В гетерогенном стекле частицы 1604-11/12 (составы полос см. в табл. 2) найдены зерна оплавленного рутила (см. рис. 6, Д), определенные по составу (СЭМ, мас. %): верхнее зерно на рисунке — SiO₂—0,51, TiO₂—95,36, сумма—95,87; нижнее зерно — Al₂O₃—0,87, SiO₂—2,18, TiO₂—93,59, сумма—96,64.

Во всех стеклах туффизитов отмечены глобулы аксессуарного троилит-пирротина величиной 1,5—60 мкм с признаками несмесимости сульфидного и силикатного расплавов (см. рис. 6, Е, 7, Г). Согласно данным СЭМ и микронзондовым анализам, часть глобул является чистым FeS, но большинство их имеет заметные количества Ni (от 0,3 до 7,91 мас. %), причем мелкие (<5—6 мкм) капли более богаты Ni, чем крупные. Кроме того, в глобулах никелистого FeS встречаются мельчайшие включения состава Fe-Ni-S с содержанием Ni от 12,51 до 17,13 мас. %, определенные по точечным анализам и профилям концентраций Ni и Fe, секущим глобулы. Одна из глобул FeS с этими включениями показана на рис. 6, Е и ее состав следующий (СЭМ, мас. %): Fe—57,83, S—34,72, Ni—0,62, Al—0,20, Si—0,42 и сумма—93,79; включение Fe-Ni-S в ней содержит 12,43 мас. % Ni. Кроме Ni в глобулах FeS иногда отмечаются (микронзонд, в мас. %): Zn (от 0,02 до 0,23), Co (от 0,07 до 0,53), Cu (от 0,01 до 2,06, а в одном случае — 8,87), а также Mn (от 0,01 до 0,07). В стеклах также найдены глобулы пентландита (см. рис. 3, А, 7, Д). Химический состав таких глобул, показанных на рис. 7, Д, следующий (СЭМ, в мас. %): глобула 1 — Si—0,28, S—31,24, Fe—35,31, Ni—23,99 и сумма—90,82; глобула 2 — Si—1,28, Al—0,31, S—34,55, Fe—35,46, Ni—20,07 и сумма—91,67.

ГЛОБУЛЫ, КРИСТАЛЛИКИ И ШИРЫ КАЛЬЦИТА

В стеклах импактных туффизитов найдены мелкие (7—30 мкм) глобулы кальцита с признаками несмесимости карбонатного и вмещающего силикатного расплавов (см. рис. 7, А—В). Обычно (но не всегда) они оторочены тонкой (<1—2 мкм), сплошной или прерывистой каймой выделений монтмориллонита(?). Его каймы характерны для кальцитовых глобул в стеклах кратера Рис [25]. Некоторые глобулы кальцита испытали частичное слияние на стадии жидкого состояния (см. рис. 7, В). Кроме капельных форм кальцит образует кристаллики в глобулах монтмориллонита (см. рис. 7, Г, Д), описываемых ниже. В частице 1904-4 содержится шпир кальцита, созданный течением уже вязкого расплава. В обратнорассеянных электронах выделения кальцита хорошо отличаются под электронным микроскопом от вмещающего стекла. Химический состав кальцита (табл. 5) в отношении ряда примесных компонентов неоднороден (мас. %): MgO — 0,37—0,98, FeO <0,01—3,25, MnO — <0,01—4,39, SO₃ — <0,01—1,05. Во всех анализах кальцита ЭДС INCA указывает на высокое содержание углерода, но количественно он не определялся.

Таблица 5. Химический состав (мас. %) индивидуальных кальцитовых глобул (А), кристалликов кальцита в глобулах монтмориллонита (Б) и шпир кальцита (В) из стекол попигайских туффизитов

Частица стекла	Тип стекла	№ анализа	CaO	MgO	FeO	MnO	SO ₃	Сумма	Примечание
1304-2/4	I	11	43,22	0,47	2,38	1,43	<0,01	47,5	Б
1304-6	I	13	49,31	0,98	2,44	2,09	<0,01	54,82	Б
		14	50,11	0,55	<0,01	<0,01	1,05	51,71	А
1304-7*	I	16	43,74	0,48	3,25	2,31	<0,01	49,78	Б
1604-1	I	1	50,32	0,6	<0,01	<0,01	<0,01	50,92	А
1604-2	I	2	49,24	0,45	<0,01	<0,01	<0,01	49,69	А
1604-3	I	5	50,39	0,73	<0,01	<0,01	<0,01	51,12	А
1604-4	I	7	49	0,62	<0,01	<0,01	0,5	50,12	А
		9	43,16	0,37	1,47	2,69	<0,01	47,69	А
		10	49,04	0,65	<0,01	<0,01	<0,01	49,69	А
1604-5	III	11	45,99	0,55	1,29	2,81	<0,01	50,64	А
		35	43,27	<0,01	1,38	4,6	<0,01	49,25	А
		36	45,29	0,5	1,32	4,39	<0,01	51,5	А
1604-14	II	35	43,27	<0,01	1,38	4,6	<0,01	49,25	А
1904-4	I	22	47,22	0,5	0,75	2,07	<0,01	50,54	В

Примечание. Анализы выполнялись на СЭМ Jeol-JSM-6400 в Университете Оулу в режиме определения всех элементов, напряжение 15 кВ. Si, Al, Ti, K и Na не обнаружены.

* Состав монтмориллонита из этой глобулы приведен в табл. 6, ан. 17.

НАЛОЖЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ГЛОБУЛЫ МОНТМОРИЛЛОНИТА

Пористые стекла туффизитов в основном изменены. Среди продуктов изменения, по рентгено-структурным данным, доминируют смектиты, а из других вторичных минералов отмечены следы хлорита, кальцита и доломита. В аншлифах по содержанию Fe и S определен пирит, который образует редкие очаги в породе. Всецело измененные стекла замещены зеленовато-желто-бурыми криптозернистыми агрегатами, а в частично измененных стеклах вторичные продукты образуют очаги и каймы по трещинам и вокруг разных включений (см. рис. 3, А, Г; 6, В, Е и 7). В измененных стеклах отмечаются миндалины, нередко с концентрически-зональным строением, выполненные различными вторичными минералами; зеленая оторочка ряда таких миндалин, вероятно, является хлоритом. Выполнение миндалин отвечает различным К-Na- и Са-содержащим водным(?) алюмосиликатам, о чем говорят низкие суммы содержаний оксидов (табл. 6). В свежих стеклах наблюдаются как миндалины, так и пустые поры.

Особо интересны глобулы однородно-криптозернистого желто-бурого материала величиной 6—50 мкм (см. рис. 3, А, Г; 7, А, Г—Е) в измененных и свежих стеклах I типа, реже II и III. Они имеют правильную форму и окружены эллиптической или кольцевой трещиной. По этой трещине и однородности они хорошо заметны даже во всецело измененных стеклах. В свежих стеклах вокруг таких глобул и трещин вокруг них развита тонкая (<5—7 мкм) кайма изменения. Некоторые глобулы содержат включения кальцита (см. рис. 7, Г, Д). Согласно данным СЭМ (см. табл. 6), глобулы сложены Fe-Mg-Са безнатровыми алюмосиликатами с большим количеством воды(?), о чем говорят низкие суммы содержаний главных оксидов. Такой состав и широкое развитие смектитов по стеклам определяет содержимое данных глобул как монтмориллонит кальциевого типа. Внутренняя пора одной глобулы частично выполнена вторичным Ва-содержащим минералом (см. табл. 6, ан. 28, 29). Профили содержаний оксидов, полученные с помощью СЭМ, показали, что глобулы и их кайма в свежем стекле аналогичны по составу, т. е. эта кайма также сложена монтмориллонитом. Глобулы монтмориллонита из импактных туффизитов астроблемы весьма близки его выделениям, описанным [25] в стеклах кратера Рис, но более однородны по составу, особенно по вариациям содержаний Al_2O_3 , FeO, MgO и CaO.

Таблица 6. Химический состав (мас.%) индивидуальных глобул монтмориллонита и миндалин из свежих стекол поппайских туффизитов

Частица стекла	Тип стекла	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	BaO	Сумма
1304-2/4	I	9	47,23	<0,01	14,55	8,23	4,86	1,85	<0,01	0,41	<0,01	<0,01	77,13
		10	47,55	<0,01	14,67	6,32	4,75	1,67	<0,01	0,39	<0,01	<0,01	75,35
		12	52,37	<0,01	16,92	7,39	5,91	1,83	<0,01	0,33	<0,01	<0,01	84,75
1304-6	I	15	44,58	0,45	14,29	10,21	4,52	2,46	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	76,81
1304-7	I	17*	48,69	<0,01	15,2	7,14	5,33	2,02	<0,01	0,53	<0,01	<0,01	78,91
		18	47,81	0,4	14,82	7,97	5,35	1,58	<0,01	0,31	<0,01	<0,01	78,24
		19	46,65	0,39	14,76	7,11	4,85	1,69	<0,01	0,4	<0,01	<0,01	75,85
1604-3	I	6	43,19	<0,01	14,25	10,69	5,06	2,42	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	75,61
1604-14	II	39	46,01	<0,01	15,14	7,37	5,43	1,85	<0,01	<0,01	0,53	<0,01	76,33
1904-4	I	23	47,06	<0,01	14,99	8,38	5,26	1,47	<0,01	0,3	<0,01	<0,01	77,46
1904-5	III	29**	47,08	<0,01	16,01	7,21	5,78	1,22	<0,01	0,71	<0,01	<0,01	78,01
		28**	44,15	<0,01	15,44	<0,01	<0,01	5,88	0,39	2,69	<0,01	1,69	70,24
1904-7/10	—	41	44,58	<0,01	14,17	11,44	7,07	1,46	<0,01	0,41	<0,01	<0,01	79,13
1904-4	—	17***	57,2	<0,01	16,97	<0,01	<0,01	0,38	4,1	3,5	<0,01	<0,01	82,15
		19***	57,1	<0,01	18,01	<0,01	<0,01	<0,01	4	2,98	<0,01	<0,01	82,09

Примечание. Анализы выполнены на СЭМ Jeol-JSM-6400 в Университете Оулу в режиме определения всех элементов, напряжение 15 кВ.

* Эта глобула содержит кристаллик кальцита (см. табл. 5, ан. 16).

** Глобула монтмориллонита (ан. 29), центральная часть которой выполнена вторичным минералом (ан. 28).

*** Миндалины, выполненные вторичными минералами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Общая макроскопия и петрография импактных туффизитов. Шлировая форма основной массы частиц стекла и следы их сваривания указывают, что глинистый компонент породы при образовании даек был жидким и высокоподвижным. Он внедрялся в гнейсы по зонам дробления и милонитизации. Струйно-вихревые формы частиц стекла и флюидальных масс обломочно-милонитовых продуктов по-

роды указывают на турбулентное смешение материала. Динамические процессы протекали во времени, достаточном для того, чтобы ряд шлиров стекла в контакте с холодным материалом даек стал пластично-вязким (окатанные частицы стекла) или был закален и раздроблен (обломки стекла). Растащенные шлиры лешательерита и других стекол указывают на неоднократные мелкие подвижки и деформации в дайках уже после внедрения материала, что можно объяснить механическим воздействием на гнейсовые глыбы при их перемещении в центробежном донном потоке. Кроме разрушения вмещающих гнейсов, образование даек импактных туффзитов сопровождалось привнесом извне обломков чуждых пород, подвергнутых абразии (окатанные частицы долерита). Привнос чуждого материала и окатанность его обломков типичен для эндогенных туффзитов [3]. На основе формальной петрографической классификации импактитов [26], импактные туффзиты можно было бы считать *дайками зювитов* (что, вероятно, не раз делалось другими геологами), но эти породы являются принципиально иной, чем зювиты, генетической разностью.

Отсутствие следов ударного метаморфизма во вмещающих гнейсах и продуктах их дробления указывает, что глыбы этих пород поступили из зоны низких (<8—10 ГПа) ударных давлений. Оценка затухания ударной волны в Попигайской астроблеме* и слабое импактирование пород ее кольцевого поднятия говорят о том, что исходно глыбы гнейсов были расположены далее 25—30 км от центра взрыва и, как минимум, здесь в них были внедрены флюидно-расплавные смеси.

Минералогические особенности стекол. Лешательерит (точка метастабильного плавления кварца ~1450 °С [29]) и другие высокотемпературные минералы (шарики магнетита, самородного Fe, продукты плавления—разложения циркона и зерна оплавленного рутила как индикаторы температур >1590, >1530, ~1800 и 1850 °С соответственно), а также коэсит и ДКС однозначно указывают на импактную природу расплавленного материала туффзитов. По известным шкалам ударного метаморфизма, например [30], этот материал возник при ударных давлениях >35—60 ГПа. Так, ДКС образуется при давлениях от 35 до 50 ГПа, лешательерит — при >50 ГПа, а коэсит — при 30—60 ГПа [31].

Состав и источник стекол. Не менее однозначно валовой химический состав стекол указывает, что основная часть расплавленного материала туффзитов, подобно другим расплавленным импактитам астроблемы, возникла при ударном плавлении гнейсов мишени. При этом стекла I типа есть продукт полной гомогенизации апогнейсового расплава, а стекла II и III типа — продукт плавления и неполной гомогенизации. В целом стекла II и III типа указывают, что расплавная компонента туффзитов возникла в краевой части зоны импактного плавления. По оценке затухания ударной волны в астроблеме, приведенной выше, радиус зоны ударного плавления гнейсов мишени ($P \sim 50$ —60 ГПа) составлял ~14—15 км. Таким образом, можно заключить, что от места своего зарождения до внедрения в гнейсы расплавная компонента импактных туффзитов была перемещена на расстояние не менее 12—15 км.

Флюидонасыщенность стекол и включения флюида. Низкие суммы содержаний оксидов во всех стеклах (см. табл. 1—3) предполагают высокое содержание летучих в них: ~3—12 мас.% для стекол I типа, ~5—24 мас.% для стекол II типа, ~12—25 мас.% для K-Na-Ca силикатных стекол III типа и ~2—7 мас.% для стекол, богатых SiO₂. Это подтверждают высокая пористость большинства стекол (вплоть до вскипания некоторых шлиров расплава в замкнутом объеме даек!), их интенсивная аргиллизация (см. ниже), обилие газовой-жидких включений в лешательерите и перлитизация свежих стекол. Все эти признаки, кроме последнего, говорят о сингенетическом источнике флюида в стеклах из гнейсов мишени. Наиболее вероятен водный флюид, но здесь нужны дополнительные исследования. Влажность гнейсов мишени неизвестна, но можно использовать аналогии. Так, содержание воды в породах фундамента Русской платформы достигает 1,8—2,6 мас.% [32], а в породах мишени кратера Рис — до ~10 мас.% [33].

Флюидизированность присуща импактным стеклам Попигайской астроблемы. Так, согласно СНМ-метрии и газовой хроматографии, в стеклах жаманшинитовой фации этой структуры содержание воды достигает 2,2 мас.% [34], в стеклах влажных тагамитов — 3,2 мас.% [35], а в продуктах импактного анатексиса гнейсов — до 6,9 мас.% [17, 21]. Общее содержание флюида H₂O + CO₂ в импактно-анатектических стеклах варьирует от 6,7 до 9,5 мас.%, а суммы содержаний оксидов, по данным микронзондовых анализов, соответственно снижены до 94,43—90,65 мас.% [17, 21]. Вода и другие летучие импактитов астроблемы были захвачены из пород мишени. В ряде других астроблем картина аналогичная. В стеклах I и II типов из зювитов кратера Рис предполагается до 6—9 мас.% H₂O (суммы содержаний оксидов 91,5—93,81 мас.%), а в стеклах III типа — до 12—17 мас.% H₂O (суммы оксидов ~83—88 мас.%); здесь

* Для той или иной астроблемы теория импактного кратерообразования позволяет сделать ряд полезных оценок на основе энергии взрыва, определяемой по различным зависимостям, например по формуле [27], согласно которой энергия Попигайского взрыва оценивается в $6,4 \times 10^{22}$ Дж. Тогда осевое затухание Z ударной волны в мишени по формуле из [28] могло быть (P , ГПа / Z , км): 60/13,9; 50/14,9; 35/17; 20/20,9; 10/27 и 5/35.

же найдены гидратированные стекла с возможным количеством H_2O до 24 мас.% (суммы оксидов до ~76—83 мас.%) [25]. В стеклах I типа из астроблемы Хафтон по низким суммам содержаний оксидов и интенсивностям пиков С и О предполагается преимущественно водный флюид с примесью CO_2 (суммы анализов ~85 мас.%), а в стеклах II типа — флюид CO_2 с подчиненным количеством H_2O (суммы анализов ~60—65 мас.%) [36]. Добавим, что высокое содержание H_2O известно также в вулканических (до 7—8 мас.% в обсидианах и риолитах [37, 38]) и искусственных (>10 мас.% H_2O [39]) стеклах. Представления о флюидонасыщенности импактных стекол в последнее время подвергаются важной ревизии. Ранее, на основе изучения тектитов, считалось, что импактные стекла очень „сухие“ (0,02—0,06 мас.% H_2O), и этот признак выделялся даже как один из диагностических критериев таких стекол (см., например, [40, 41]). Однако это заключение справедливо, вероятно, только для тектитов, которые подвергались сильной дегазации [25, 34].

Газово-жидкие включения в лешательерите парадоксальны. Хотя минимальная температура метастабильного плавления кварца составляет порядка 1450 °С [29, 42], но сопутствующие высокотемпературные акцессории в стеклах туффизитов указывают, что температура шлиров SiO_2 могла достигать 1800—1900 °С, и оценка ее величины значением ~1700 °С является разумным пределом. В этом случае давление флюидных включений, в случае их водного состава, при стекловании лешательерита составляло ~0,8—3,3 ГПа (см. [11], согласно данным [43]) и не было литостатическим. Из этого следует, что флюидно-расплавные смеси внедрялись в гнейсы с некоторым остаточным ударным давлением, обеспечившим их высокую мобильность. Вмещающие гнейсы и источники расплава находились в разных зонах импактирования. Отсюда следует, что остаточное давление смесей сохранялось после их значительного (~12—15 км) перемещения от источника до точки динамического контакта с гнейсами. Для „сухих“ систем с быстрой разгрузкой от ударных давлений по волновому механизму это проблематично. В этой связи мы предполагаем, что именно флюидизированность огромных масс импактного расплава Попигайской астроблемы была причиной их замедленного разгружения при экскавации. Такое замедление известно в ударных экспериментах на „влажных“ системах [44, рис. 2, А], где были получены ударные адиабаты сжатия и разгрузки сухих и влажных пород. По [44] с некоторого момента расширение сжатой флюидизированной системы начинает определяться поведением флюида, который стремится к объемному расширению, на несколько порядков более высокому, чем таковое для сухих силикатных систем. Это справедливо для широкого круга влажных гранитоидов и других кристаллических пород, сжатых до давления $>50—60$ ГПа. Расширяясь в расплаве, пузырьки перегретого флюида работают против сил вязкого трения, и разгрузка всей системы происходит теперь уже не волновым, а более медленным поршневым способом. Поэтому пузырьки сжатого флюида во влажных импактных расплавах играют роль буфера-замедлителя разгрузки [19]. Этим можно объяснить высокое остаточное ударное давление флюидно-расплавных смесей астроблемы в момент их внедрения в глыбы гнейсов.

Наложённые изменения породы. Интенсивная аргиллизация импактных туффизитов, в результате которой гиалиновая часть породы была в основном замещена смектитом, выглядит довольно контрастно на фоне слабых вторичных преобразований вмещающих гнейсов. Корреляция интенсивности изменения (и степени пористости) стекла с его количеством в породе объясняется закалкой и указывает, что аргиллизация была стимулирована высокой температурой и протекала сразу же после образования даек. Это, как и относительная свежесть вмещающих гнейсов, показывает, что основным агентом таких изменений была собственная вода породы. Перлитизация стекол могла протекать с участием как собственной, так и метеорной воды. Аргиллизация (смектиты) и перлитизация импактных стекол широко развита в других астроблемах [25, 45 и др.].

Глобулы и шпирь кальцита. Выделения карбонатного расплава в несмесимом соотношении с вмещающим стеклом для Попигайской астроблемы описаны впервые. Ранее аналогичные глобулы кальцита были найдены в кратерах Чикскулуб [46], Рис [25, 47], Хафтон [36] и Болтышский (устное сообщение А.А. Вальтера). Источником карбонатных расплавов в этих астроблемах послужили соответствующие разности пород мишени, а в Попигайской астроблеме — продукты ударного плавления кембрийских карбонатных звеньев мишени. Находки карбонатного расплава в астроблемах имеют важное петрологическое значение как доказательства ударного плавления карбонатных пород. При давлениях $>10—25$ ГПа эти породы, как показано в [36], не диссоциируют, а плавятся, причем поровая вода снижает точку их плавления. Таким образом, широко распространенное мнение о том, что при ударном метаморфизме карбонатных толщ происходит их разложение (например, [48, 49 и др.]), и в атмосферу выбрасывается большое количество CO_2 , не подтверждается.

Глобулы монтмориллонита. Их генезис можно объяснить двумя моделями. По одной из них они являются миндалинами, но эта модель проблематична как для свежих стекол породы, где глобулы окаймлены лишь тонкой оторочкой наложенных изменений, так и для всецело аргиллизированных, где глобулы хорошо заметны по структурно-текстурным особенностям. Такое же заключение было сделано

ранее для глобул монтмориллонита в стеклах кратера Рис [47]; свежесть стекол этого кратера исключает интенсивное изменение, в результате которого такие глобулы можно считать миндалинами. Другим аргументом *pro contra* являются кристаллы кальцита в этих глобулах (см. рис. 7, Г), который одновременно образует собственные выделения в стекле со следами несмесимости карбонатного и силикатного расплавов. Поэтому более предпочтительна другая модель, согласно которой родительским веществом глобул монтмориллонита были капли некоторого очень гидратированного (до 20—25 мас.% воды) силикатного расплава *X*, несмесимого с апогнейсовым, а в некоторых случаях и с карбонатным расплавами (см. ниже). После закалки и девитрификации по глобулам стекла *X* возник монтмориллонит, а излишняя вода приняла участие в изменении вмещающего стекла, в результате чего вокруг глобул возникли кайма аргиллизации и трещина усадки. Аналогичная модель предложена для глобул монтмориллонита в стеклах кратера Рис [25]. Известно [50, 51], что при давлениях >1 ГПа вода и различные минералы образуют высокогидратированные силикатные расплавы (>40—50 мас.% H₂O), а в условиях ударного плавления — даже силикатный суперкритический флюид с неограниченной смесимостью компонентов (например, флюид SiO₂-H₂O). Остывая, такие расплавы и флюиды распадаются на несмесимые фазы с выделением избыточной воды (см. [25, 44, 50] и ссылки в них). Появление таких расплавов и флюидов на водонасыщенных породах вполне возможно при *PT*-параметрах ударного процесса. Источником гидратированного расплава или флюида для глобул монтмориллонита в Попигайской астроблеме могли послужить палеозойские и мезозойские песчано-глинистые мишени. В рамках такой модели отсутствие Na₂O в глобулах монтмориллонита предполагает, что родительские песчано-глинистые породы были зрелыми осадочными продуктами с высоким K₂O/Na₂O (см. данные [52] по петрохимии осадочных пород). Ассоциация глобул кальцита и монтмориллонита в стеклах туффзитов указывает на сложное динамическое взаимодействие продуктов ударного плавления из пространственно разных горизонтов мишени. Согласно модели гидратированного расплава *X*, глобулы монтмориллонита с кальцитом были несмесимой эмульсией соответствующих расплавов. Далее в каплях такой эмульсии карбонатный расплав кристаллизовался в кальцит (температура кристаллизации ~500—600 °С [53]), а из гидратированного расплава *X* одновременно или позже образовался монтмориллонит.

Никельсодержащие глобулы FeS и других сульфидов в стеклах ударных туффзитов аналогичны аксессуарам в ряде расплавных ударных астроблем [54, 55]. Такие же сульфиды найдены в стеклах кратеров Рис [56], Восточный Клируотер [57] и других астроблем. Считается, что это остатки вещества ударника [55, 57]. Однако было показано, что в гнейсах мишени Попигайской астроблемы также имеются Ni-содержащие сульфиды, поэтому глобулы этих минералов в апогнейсовых ударных туффзитах не являются метеоритным веществом [58, 59]. Сферулы самородного никелистого железа в фемических стеклах туффзитов могут быть возможными остатками вещества Попигайского астероида и, с учетом динамики образования ударных туффзитов, дальнейшее изучение этих сферул представляет интерес. Комплексный состав флюидно-расплавных смесей туффзитов с участием вещества из разных звеньев мишени не исключает наличия здесь струй материала, контаминированного веществом ударника. Уже предполагалось, что расплавные ударные туффзиты среди клиппенов и мегабрекчий Попигайской астроблемы могут содержать примесь метеоритного материала [60]. Вещество ударника в виде частиц самородных Ni [61], Fe-Ni [61, 62] и Fe-Cr-Ni [63] известно в ударных туффзитах и породах мишени из кратеров Рис, Лонар, Лаппярви и других астроблем. Авторы [61] считают, что внедрения газорасплавных продуктов в трещины пород мишени могут привноситься из метеоритного вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Ударные туффзиты Попигайской астроблемы возникли как внедрения высокоподвижных флюидно-расплавных смесей в слабоимпактированные (<8—10 ГПа) гнейсы мишени. Источником смесей были апогнейсовые продукты сильного ударного метаморфизма. При их экскавации произошел частичный захват продуктов ударного плавления карбонатных и других пород мишени.

2. Гетерогенность стекол ударных туффзитов показывает, что эти смеси возникли на внешнем рубеже зоны ударного плавления. Следы карбонатного (глобулы кальцита) и, предположительно, богатого водой силикатного (монтмориллонитовые глобулы) расплавов, несмесимых с апогнейсовым расплавом, описаны для Попигайской астроблемы впервые.

3. Высокая флюидизированность смесей прямо или косвенно следует из ряда особенностей стекол ударных туффзитов (низкие суммы содержания оксидов, высокая пористость, автоаргиллизация, газово-жидкие включения в лешательерите, глобулы монтмориллонита) и указывает на сингенетичную природу флюида, унаследованного из пород мишени.

4. При водном составе флюидных включений в лешательерите давление при внедрении смесей составило бы ~0,8—3,3 ГПа и не могло быть литостатическим. Из этого следует неполное разгружение флюидно-расплавных смесей от ударной нагрузки и весьма вероятное буферное действие флюида, замедлившее спад ударных давлений.

5. Сферулы самородного никелистого железа в некоторых стеклах туффзитов не исключают контаминации этих пород веществом Попигайского астероида.

Рукопись статьи улучшена по конструктивным замечаниям А.А. Вальтера (Киев) и Г.П. Вдовыкина (Москва), которым мы глубоко признательны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 04-05-64127) и гранта Академии наук Финляндии (№ 207759).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Голубева И.И.** Флюидизаты как особый класс магматических образований // III международная конференция „Новые идеи в науках о Земле“ (Москва, 1997): тез. докл., Т. 1. М., 1997, с. 42—43.
2. **Казак А.П., Якобсон К.Э.** Инъекционные туффзиты — новый класс горных пород // Региональная геология и металлогения, 1997, № 6, с. 168—169.
3. **Махлаев Л.В., Голубева И.И.** Флюидизаты требуют внимания // Природа, 2001, № 9, с. 59—68.
4. **Якобсон К.Э., Казак А.П., Толмачева Е.В.** Туффзиты под Санкт-Петербургом // Природа, 2003, № 5, с. 61—63.
5. **Cloos H.** Bau und Tätigkeit von Tuffscholten. Untersuchungen an dem Schwabischen Vulkan // Geologische Rundschau, 1941, Bd. 32, S. 708—800.
6. **Reinolds D.L.** Fluidization as a geologic process, and its bearing on the problem of intrusive granites // Amer. J. Sci., 1954, v. 252, № 10, p. 577—614.
7. **Булах А.Г.** Валунные дайки Турьего мыса — загадочные породы южного побережья Кольского полуострова // Природа, 1960, № 4, с. 100—102.
8. **Смолин П.П.** К петрогенетической типизации интрузивных пирокластитов (с характеристикой „эруптивных брекчий“ Алдана) // Жизнь Земли (сборник Музея землеведения МГУ, № 6). М., Изд-во Моск. ун-та, 1970, с. 49—65.
9. **Голубева И.И., Махлаев Л.В.** Магматогенные флюидизаты и их положение в систематике горных пород: новый класс или новый тип? // Петрография на рубеже XXI века: итоги и перспективы, Т. 1 (Труды Второго всерос. петрогр. совещания). Сыктывкар, 2000, с. 54—56.
10. **Vishnevsky S.A., Raitala J., Gibsher N.A. et al.** Breccia veins, pseudotachylites, and fluidizite dykes in Archean gneiss fragments from the Popigai megabreccia (abs. № 4034) // Third International Conference on Large Meteorite Impacts (Nordlingen, Germany, August 5—7, 2003). Houston, USA, Lunar and Planetary Institute, 2003, Contribution № 1167 (www.lpi.usra.edu/meetings/largeimpacts2003/abstractvolume).
11. **Vishnevsky S.A., Raitala J., Gibsher N.A. et al.** The Popigai „fluidizite“ dykes: new data on their mineralogy and petrology // Meteorit. Planet. Sci., 2004, v. 39, Supplement, p. A109.
12. **Вальтер А.А.** Феномен Первомайского месторождения в Криворожье и роль Я.Н. Белевцева в его познании // Минер. журн., 1997, т. 19, № 5, с. 72—84.
13. **Вальтер А.А., Гурский Д.С., Еременко Г.К., Бочко А.В.** Импактные алмазы — новый вид минерального сырья Украины // Мінеральні ресурси України, 1999, № 3, с. 16—22.
14. **Вишневецкий С.А.** Импактные формации гигантских сложных метеоритных кратеров // Импаکتиты / Ред. А.А. Маракушев. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981, с. 171—184.
15. **Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В.** Попигайский метеоритный кратер. М., Наука, 1975, 124 с.
16. **Масайтис В.Л., Машак М.С., Селивановская Т.В. и др.** Попигайская астроблема // Геология астроблем / Ред. Ю.Е. Погребницкий. Л., Недра, 1980, с. 114—130.
17. **Vishnevsky S., Montanari A.** The Popigai impact structure (Arctic Siberia, Russia): geology, petrology, geochemistry and geochronology of glass-bearing impactites // Large meteorite impacts and planetary evolution II / Eds. B.O. Dressler and V.L. Sharpton. Boulder, Colorado (USA). Geol. Soc. America, 1999, Special Paper 339, p. 19—59.
18. **Вишневецкий С.А.** Зювитовые мегабрекчии — новый тип отложений взрывного облака Попигайской астроблемы. Новосибирск, ОИГМ СО РАН, 1994, 66 с. (Препр. ОИГМ СО РАН).
19. **Вишневецкий С.А., Поспелова Л.Н.** Флюидный режим импаکتитов: плотные флюидные включения в высококремнеземистых стеклах и их петрологическое значение. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1988, 53 с. (Препр. ИГиГ АН СССР, № 16).
20. **Вишневецкий С.А., Пальчик Н.А.** Коэсит в брекчиях структуры Жаманшин // Докл. АН СССР, 1978, т. 243, № 5, с. 1269—1272.
21. **Вишневецкий С.А., Поспелова Л.Н.** Импактный анатексис на примере ударно-метаморфизованных гнейсов Попигайской астроблемы // Метеоритное вещество и Земля / Ред. Ю.А. Долгов. Новосибирск, Наука, 1986, с. 117—131.

22. **Фельдман В.И.** Петрология импактитов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1990, 299 с.
23. **Stahle V.** Natural shock behavior of almandine in metamorphic rocks from the Ries crater, Germany // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1975, v. 25, № 1, p. 71—81.
24. **Grieve R.A.F., Ber T.J.** Shocked lithologies at the Wanapitei impact structure, Ontario, Canada // *Meteoritics*, 1994, v. 29, p. 621—631.
25. **Osinski G.R.** Impact glasses in fallout suevites from the Ries impact structure, Germany: an analytical SEM study // *Meteorit. Planet. Sci.*, 2003, v. 38 (11), p. 1641—1667.
26. **Stoffler D., Grieve R.A.F.** Classification and nomenclature of impact metamorphic rocks, a proposal to the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks // *European Science Foundation, Network on impact cratering and evolution of planet Earth / Eds. A. Montanari and J. Smith. Post-Ostersund Newsletter. Osservatorio Geologico di Coldigioco (Italy)*, 1994, p. 9—15.
27. **Dence M.R., Grieve R.A.F., Robertson P.B.** Terrestrial impact structures: principal characteristics and energy considerations // *Impact and explosion cratering / Eds. D.J. Roddy, R.O. Pepin, and R.B. Merrill. New York, Pergamon Press*, 1977, p. 247—275.
28. **Иванов Б.А., Базилевский А.Т., Сафонова Л.В.** Об образовании центрального поднятия в метеоритных кратерах // *Метеоритика*, 1982, т. 40, с. 67—81.
29. **Торопов Н.А., Базарковский В.П., Бондарь И.А., Удалов Ю.П.** Диаграммы состояния силикатных систем: Справочник. Л., Наука, 1970, 131 с.
30. **Koeberl C., Anderson R.R.** Manson and company: impact structures in the United States // *The Manson impact structure, Iowa: anatomy of an impact crater / Eds. C. Koeberl and R.R. Anderson. Geol. Soc. Amer.*, 1996, Spec. Paper 302, p. 1—29.
31. **Stoffler D., Langenhorst F.** Shock metamorphism in nature and experiment: basic observations and theory // *Meteoritics*, 1994, v. 29, p. 155—181.
32. **Справочник геофизика**, Т. I. М., Гостопиздат, 1960, 636 с.
33. **Engelhardt W., Stoffler D., Schneider W.** Petrologische Untersuchungen im Ries // *Geologica Bavarica*, 1969, v. 61, p. 229—295.
34. **Вишневецкий С.А., Гилянская Л.Н., Лебедева С.М. и др.** Флюидальные тонкополосчатые стекла в зювитах некоторых астроблем (и среди некоторых тектитов): аккреционно-смесительная модель образования во взрывном облаке крупных импактных событий // *Уральский минералогический сборник*, 2002, № 12, с. 234—279.
35. **Vishnevsky S.A.** Two groups of Popigai impact glasses: a result of initial water content in target rocks // *Chemie der Erde*, 1996, v. 56, p. 493—497.
36. **Osinski G.R., Spray J.G.** Impact-generated carbonate melts: evidence from the Haughton structure, Canada // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 194, p. 17—29.
37. **Наседкин В.В.** Водосодержащие вулканические стекла кислого состава, их генезис и изменения. М., Изд-во АН СССР, 1963, 211 с.
38. **Anderson A.T., Newman S., Williams S.N. et al.** H₂O, CO₂, Cl, and gas in Plinian and ash-flow Bishop rhyolite // *Geology*, 1989, v. 17, p. 221—225.
39. **Lofgren G.** An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization // *Amer. J. Sci.*, 1974, v. 274, № 3, p. 243—273.
40. **Koeberl C., Beran A.** Water content of tektites and impact glasses and related chemical studies // *Proceedings of 18th Lunar and Planetary Science Conference. Cambridge, Cambridge University Press*, 1988, p. 403—408.
41. **Beran A., Koeberl C.** Water in tektites and impact glasses by Fourier-transformed infrared spectrometry // *Meteorit. Planet. Sci.*, 1997, v. 32, p. 211—216.
42. **Вальтер А.А., Барчук И.Ф., Булкин В.С. и др.** О вероятном составе Эльгыгытгынского метеорита // *Письма в астрономический журнал*, 1982, № 2, с. 115—120.
43. **Juza J., Sifier 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 // *Proceedings of the 10th International Conference on Properties of Steam. Moscow, Mir*, 1986, p. 106—116.
44. **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.
45. **Engelhardt W.** Suevite breccia of the Ries impact crater, Germany: petrography, chemistry and shock metamorphism of crystalline rock clasts // *Meteor. Planet. Sci.*, 1997, v. 32, p. 545—554.
46. **Jones A.P., Heuschkel S., Claeys P.** Comparison between carbonate textures in Chicxulub impact rocks and synthetic experiments // *Meteor. Planet. Sci.*, 1998, v. 33, Supplement, p. A79.

47. **Graup G.** Carbonate-silicate liquid immiscibility upon impact melting: Ries crater, Germany // *Meteorit. Planet. Sci.*, 1999, v. 34, p. 425—438.
48. **Martinez I., Agrinier P., Scharer U., Javoy M.** A SEM-ATEM and stable isotope study of carbonates from the Haughton crater, Canada // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, v. 121, p. 559—574.
49. **Stoffler D., Artemieva N.A., Pierazzo E.** Modeling the Ries-Steinheim impact event and the formation of the moldavite strewn field // *Meteor. Planet. Sci.*, 2002, v. 37, p. 1893—1907.
50. **Kieffer S.W., Phakey P.P., Christie J.M.** Shock processes in porous quartzite: transmission electron observations and theory // *Contr. Miner. Petrol.*, 1976, v. 59, № 1, p. 41—93.
51. **Bureau H., Keppler H.** Complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids in the upper mantle: experimental and geochemical implications // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, v. 165, p. 187—196.
52. **Петгиджон Ф.И., Потгер П., Сивер Р.** Пески и песчаники. М., Мир, 1976, 534 с.
53. **Barker D.S.** Field relations of carbonatites // *Carbonatites: genesis and evolution* / Ed. K. Bell. London, Unwin Hyman, 1989, p. 38—69.
54. **Вишнеvский С.А.** Некоторые рудные минералы в импактных стеклах Попигайской структуры // *Методология и методика геологических и геофизических исследований в Сибири.* Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1975, с. 105—115.
55. **Масайтис В.Л., Сысоев А.Г.** Метеоритное вещество в импактиках Попигайского кратера // *Письма в астрономический журнал*, 1975, т. 1, № 4, с. 43—47.
56. **El-Goresy A., Fechtig H., Ottemann J.** Opaque minerals in impactite glasses // *Shock metamorphism of natural materials.* Baltimore. Mono Book Corporation, 1968, p. 531—554.
57. **Grieve R.A.F., Palme H., Plant A.G.** Siderophile-rich particles in the melt rocks at the East Clearwater impact structure, Quebec: their characteristics and relationship to the impacting body // *Contr. Miner. Petrol.*, 1980, v. 35, № 3, p. 187—198.
58. **Вишнеvский С.А.** О происхождении обогащенного никелем троилит-пирротина в импактиках Попигайской структуры // *Геология и геофизика*, 1976 (7), с. 110—112.
59. **Вишнеvский С.А., Поспелова Л.Н.** Некоторые петролого-геохимические особенности проблемы импактных взаимодействий // *Метеоритные исследования в Сибири* / Ред. Ю.А. Долгов. Новосибирск, Наука, 1984, с. 156—191.
60. **Вишнеvский С.А.** Краевая часть Попигайской астроблемы: импактные диатремы и горсты, новая интерпретация глубинного строения // *Космическое вещество и Земля* / Ред. Ю.А. Долгов. Новосибирск, Наука, 1986, с. 131—159.
61. **Kearsley A., Graham G., McDonnell T. et al.** Early fracturing and impact residue emplacement: can modeling help to predict their location in major craters? // *Meteor. Planet. Sci.*, 2004, v. 39, № 2, p. 247—265.
62. **Fregerlev S., Carstens H.** Fe-Ni metal in impact melt rocks of Lake Lappajarvi, Finland // *Contr. Miner. Petrol.*, 1976, v. 55, p. 255—263.
63. **El-Goresy A., Chao E.C.T.** Evidence of impacting body of the Ries crater — the discovery of Fe-Ni-Cr veinlets below the crater bottom // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1976, v. 31, № 3, p. 330—340.

*Рекомендована к печати 20 июля 2005 г.
Н.В. Соболевым*

*Поступила в редакцию
31 января 2005 г.*