

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИСПАРЕНИЮ ОБСИДИАНА И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ К АНАЛИЗУ СОСТАВОВ ИМПАКТНЫХ СТЕКОЛ

Яковлев О. И. (ГЕОХИ РАН; yakovlev@geokhi.ru), Диков Ю. П. (ИГЕМ РАН; dikov@igem.msk.su), Герасимов М. В. (ИКИ РАН; mgerasim@mx.iki.rssi.ru).

При образовании ударных кратеров вещество ударника и пород мишени могут претерпеть химические изменения, сопряженные, как правило, с селективным испарением ударного расплава и последующей частичной конденсацией пара [1-4]. Несмотря на неизбежность протекания этих процессов при высокоскоростном соударении, вопрос о роли испарения и конденсации в формировании состава пород ударных кратеров остается до сих пор открытым. Задача по выявлению испарительной составляющей в импактном веществе представляется на сегодняшний день исключительно сложной. Среди подходов в ее решении центральное место занимает экспериментальное изучение испарения силикатных расплавов в области высоких температур. При этом особый интерес представляют экспериментальные данные по ударному испарению гранитоидных пород, слагающих в большинстве случаев мишени земных кратеров. Однако, несмотря на высокую потребность в данных по составам гранитоидных продуктов испарения, систематических экспериментальных исследований в этом направлении практически не проводилось. Для изучения этого вопроса, а также с целью поиска надежных петрохимических критериев трансформации состава расплавных импактитов, сопряженных с испарением, мы провели модельные эксперименты по импульсному высокотемпературному плавлению образца обсидиана, состав которого в первом приближении близок составам мишеней многих земных кратеров. В задачу эксперимента входило изучение химических трендов испарительной дифференциации, и выявление корреляционных зависимостей изменения состава расплава. Конечная цель работы состояла в приложении полученных данных для выработки методики идентификации признаков испарения в реальных расплавных импактитах кратеров.

В эксперименте был использован образец среднего по составу обсидиана (мас. % $\pm \sigma$): SiO₂ 57.90 $\pm$ 0.19; TiO₂ 1.32 $\pm$ 0.09; Al₂O₃ 15.02 $\pm$ 0.15; FeO 9.31 $\pm$ 0.18; MgO 5.11 $\pm$ 0.10; CaO 7.37 $\pm$ 0.10; Na₂O 2.99 $\pm$ 0.09; K₂O 0.53 $\pm$ 0.04. Микронзондовый анализ различных участков образца (10 анализов) показал высокую степень однородности обсидиана. Ударная имитация плавления и испарения обсидиана была выполнена на лазерной установке по методике, подробно описанной в [5]. Основные параметры лазерного импульса были: длина волны излучения $\lambda=1.06$ мкм, энергия импульса 400-600 Дж, плотность мощности излучения $\sim 10^6$ - 10^7 Вт/см², длительность импульса $\sim 10^{-3}$ сек, диаметр пучка фокусировки ~ 3 мм. Характерная температура вещества в области фокусировки лазерного пучка составляла ~ 4000 - 6000 К, а давление – в пределах 100-1000 бар. Необходимо отметить высокую температуру в зоне испарения образца, которая, согласно расчетам, эквивалентна температуре удара со скоростями ~ 10 -20 и более км/сек [5,6]. Образец обсидиана закреплялся в герметичной камере с внутренним объемом ~ 500 см³. Эксперименты проводились в атмосфере He при давлении 1 атм. Пучок лазерного излучения расплавлял и испарял несколько десятков мг образца. На пути разлета облака силикатного пара и капель расплава на расстоянии ~ 7 см от образца устанавливался медный экран, на поверхности которого происходила конденсация пара и закалка расплава. Образование капель расплава (после закали – сферул стекла) объясняется диспергацией расплава, выброшенного под давлением струи испаренного пара из «кратерной» полости образца. Диаметр стеклянных сферул находился в пределах от 0.5 до 20 мкм. Диаметр основной массы сферул ($\sim 90\%$) попадал в интервал 0.5-1.5 мкм. Количественный химический анализ стекол на главные элементы (Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K), был выполнен рентгено-спектральным методом на сканирующем электронном микроскопе (метод SEM-EDS). Всего было проанализировано 83 сферулы. Кроме этого, десять определений состава было сделано на стеклах, расположенных внутри «кратерной полости». Поскольку часть анализов была выполнена на сферулах критически малого размера (~ 0.5 мкм), то количественные определения в этих объектах не могут претендовать на высокую точность. Это относится прежде всего к элементам с низкой концентрацией и, в частности, к калию, концентрация которого изначально была низкой.

Анализы стекол свидетельствуют о резкой химической гетерогенности продуктов лазерного плавления. Большие различия составов наблюдаются как между отдельными сферами, так и микроучастками «кратерных» стекол, которые в некоторых случаях располагались друг от друга на расстояниях менее 5 мкм. Составы сферул имеют широкий разброс содержаний по всем элементам, и большая часть этих составов значительно отличается от состава исходного обсидиана. В большинстве сферул произошли большие потери щелочей и умеренно летучих - железа и кремния. При этом содержания труднолетучих - кальция, титана и алюминия резко увеличились. Очевидно, что химические изменения расплава произошли вследствие селективного испарения. Очевидно также, что эти изменения произошли за интервал времени, в течение которого сферулы находились в жидком состоянии. По нашим оценкам «время жизни» расплава было исключительно коротким и составляло $\sim 0.1-0.01$ сек. Поскольку время испарения для большинства сферул было примерно одинаково, то главным фактором, определившим наблюдаемое разнообразие составов, была температура. Другими словами, разнообразие составов стекол – это отражение температурной гетерогенности расплава, а широкий разброс содержаний элементов – это отражение широкого спектра температурных условий плавления и испарения обсидиана. Каждый отдельно взятый состав сферулы сформировался в ходе индивидуальной термической истории капли расплава, а совокупность составов представляет своеобразную развертку температур испарения. Различия в поведении компонентов расплава наглядно иллюстрируют концентрационные диаграммы, на горизонтальных осях которых отложены содержания алюминия (рис. 1-3). Такой способ построения диаграмм позволяет качественно оценивать летучести главных компонентов расплава относительно наименее летучего (алюминия), и выявлять наличие концентрационных корреляционных связей, возникающих в процессе испарения. На диаграммах обозначены также точки содержаний соответствующих элементов в стеклах из «кратерной» выемки образца и точка содержаний в исходном обсидиане. Данные на рисунках показывают, что с ростом содержания алюминия в сферах стекла содержание Na, Si, Fe уменьшается. При этом наблюдается отчетливая отрицательная корреляция между содержаниями Si и Al (рис.2).

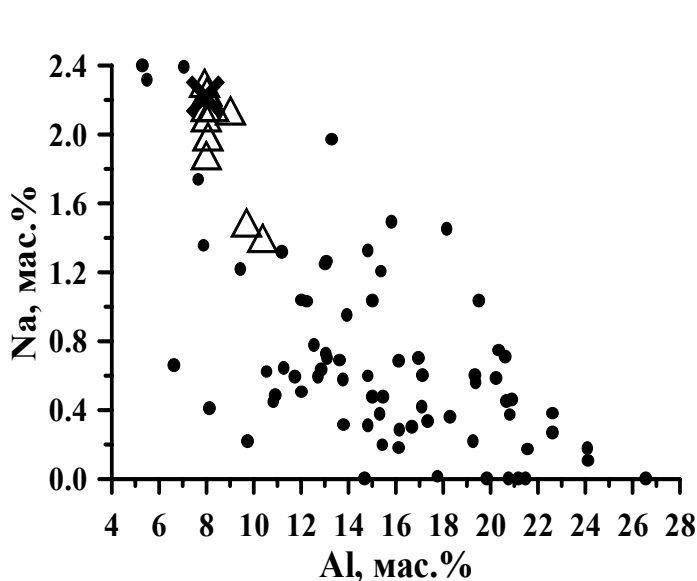


Рис. 1

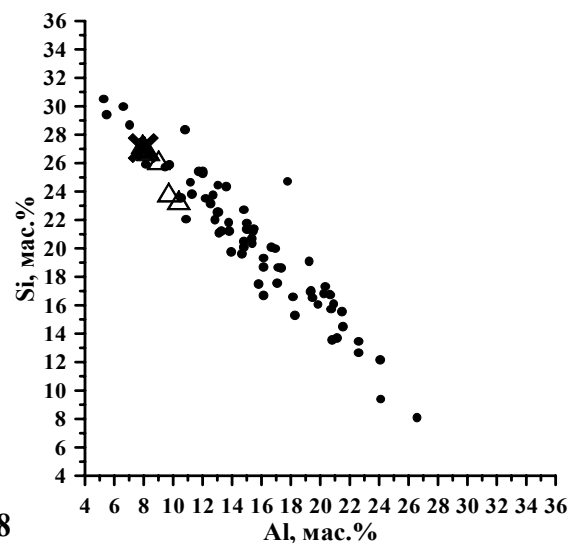


Рис. 2

Для популяции низкотемпературных стекол отмечаются меньшие испарительные потери калия по сравнению с натрием. На рис. 4 показано, что отношения K/Na во всех стеклах «кратерной» полости имеют значения выше, чем в исходном обсидиане. Эти данные полностью соответствуют представлениям о понижении летучести калия по сравнению с натрием при испарении средних и кислых расплавов.

Как и в эксперименте, спектр составов стекол реальных ударных кратеров должен отражать многообразные температурные условия плавления и испарения ударного расплава. В качестве объектов для сопоставления с экспериментальными результатами были выбраны стекла Логойского кратера [7]. Логойский кратер ($d \approx 15-18$ км) расположен на территории Белоруссии. Мишенный комплекс ударной структуры имеет двухслойное строение: нижняя его часть сложена кристаллическими породами (гранито-гнейсами), верхняя – горизонтально залегающими

толщами осадочных пород. Несмотря на двухслойный характер мишени, основная масса расплавных импактитов образована за счет гранито-гнейсов, средний состав которых (мас. % $\pm \sigma$): SiO_2 68.38 ± 1.98 ; TiO_2 0.64 ± 0.12 ; Al_2O_3 14.40 ± 0.62 ; FeO 4.72 ± 1.04 ; MgO 1.63 ± 0.44 ; CaO 2.00 ± 0.55 ; Na_2O 2.72 ± 0.31 ; K_2O 4.65 ± 1.08 . Сами гранито-гнейсы представлены, в основном, однотипными лейкократовыми разностями и, в меньшей степени, биотитовыми гнейсами. Присутствие последних отразилось на довольно больших значениях стандартного отклонения в содержаниях K_2O и FeO . Импактные стекла разделены авторами монографии [7] на «мономинеральные», близкие по составу отдельным минералам, и на «полиминеральные» или смешанные, близкие по составу породам. Для поиска испарительных эффектов изменения состава и сравнения их с экспериментальными данными мы использовали составы только «полиминеральных» стекол. Судя по описанию, они имели разную морфологию (шарики, обломки) и цвет (от бесцветных до темно-коричневых). Число определений состава «полиминеральных» стекол представлено в монографии 168 микрозондовыми анализами. Из этого числа анализов мы выбрали 56 составов, характеризующие наиболее свежие и однородные стекла. Содержания в них контрастных по летучести окислов: Na_2O , FeO , SiO_2 , Al_2O_3 , а также отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, показаны на рис. 5, 6, 7, 8. На всех рисунках показано положение точки среднего состава гранито-гнейсов с соответствующими стандартными отклонениями. На рис. 5 нанесена также точка среднего состава песчаников – наиболее распространенных пород верхней части мишенного комплекса.

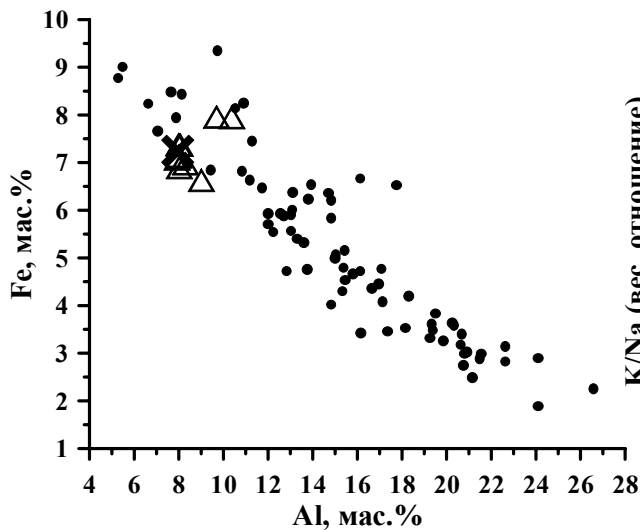


Рис. 3

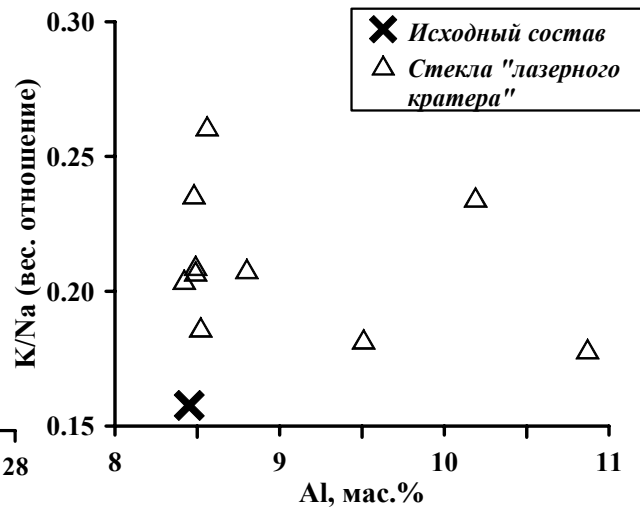


Рис. 4

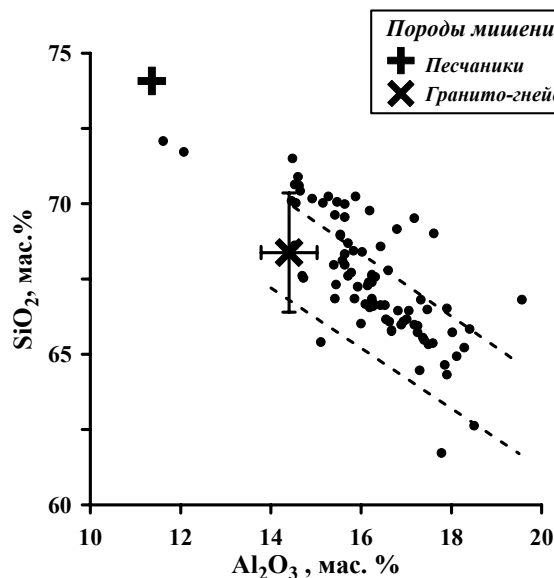


Рис. 5

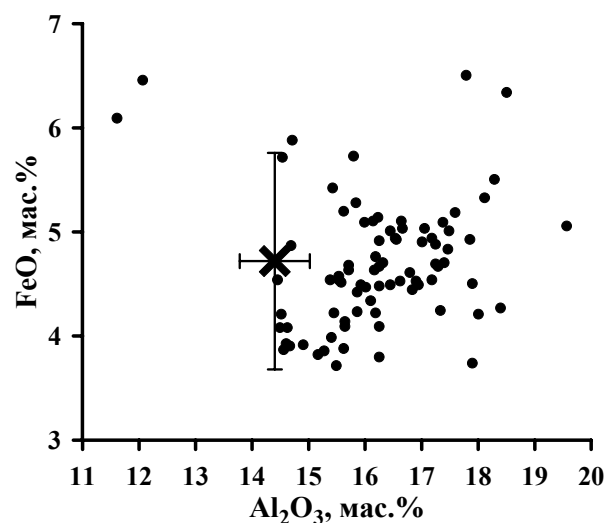


Рис. 6

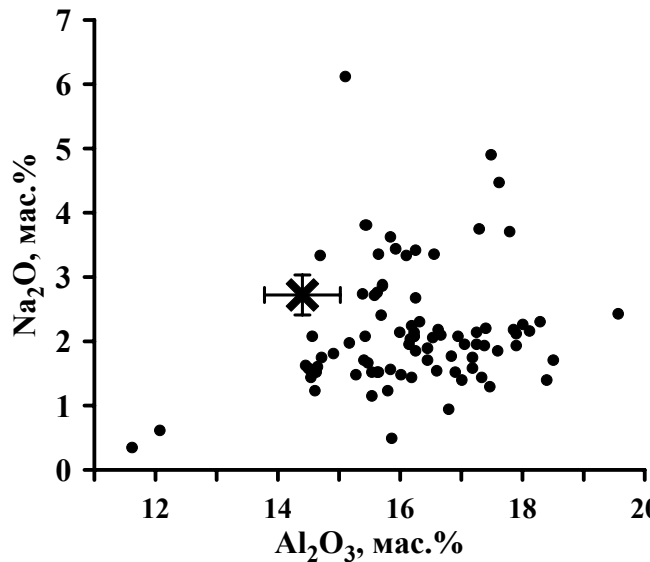


Рис. 7

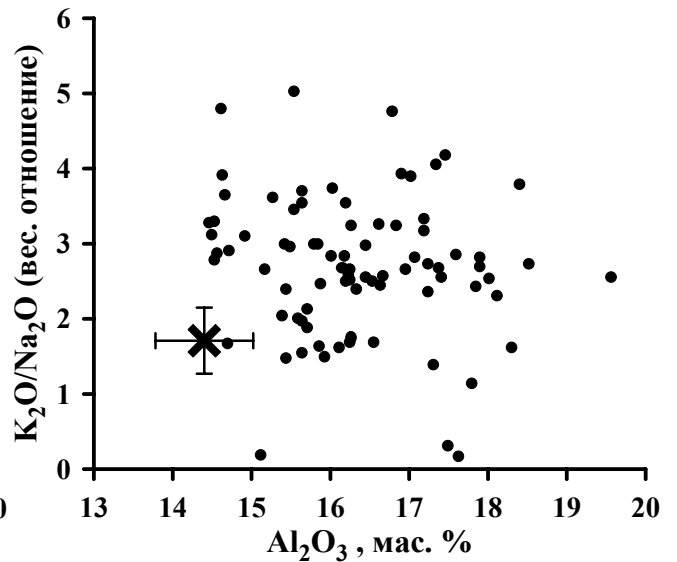


Рис. 8

На представленных рисунках составы стекол расположены хаотично и не содержат явных корреляционных зависимостей, свидетельствующих об испарении компонентов расплава. Это обычная картина разброса составов, с которой приходится сталкиваться при изучении расплавных продуктов ударных кратеров. Однако вряд ли следует сомневаться, что, по крайней мере, часть стекол образовалась в результате высокотемпературного плавления и претерпела изменение состава при частичном испарении. В связи с этим возникает задача, как среди множества импактных стекол выявить те из них, состав которых обусловлен селективным испарением. Для решения поставленной задачи мы предлагаем метод, основанный на изложенных в настоящей статье экспериментальных данных. Суть метода заключается в “наложении” экспериментально установленных трендов на составы природных стекол с последующим отбором тех из них, составы которых имеют испарительные признаки, подобные экспериментальным. Можно предположить, что хорошо выраженная в экспериментальных данных взаимосвязь уменьшения содержания кремния при его испарении и увеличения (накопления) алюминия в расплаве по мере роста температуры также должна проявляться в некоторой популяции импактных стекол. Тогда для нахождения этой популяции на соответствующей диаграмме SiO_2 - Al_2O_3 среди беспорядочного роя точек (рис. 5) следует выделить такую группу составов, которая образует тренд, аналогичный экспериментальному. Очевидно, что тренд должен начинаться, как и в эксперименте, в точке исходного состава мишенных пород. На рис. 5 искомая популяция стекол, с отрицательно скоррелированными содержаниями SiO_2 и Al_2O_3 , оконтурена пунктирными линиями. Опираясь на экспериментальные данные, можно предполагать также, что в эту область составов попадают исключительно высокотемпературные стекла. Для проверки надежности предлагаемого метода может служить следующий тест. Если выделенная группа составов стекол сформировалась при селективном испарении, то признаки испарения должны проявиться в данной группе и для других компонентов расплава. Наши экспериментальные данные показывают, что при испарении кислых и средних по кислотности расплавов наиболее характерные изменения происходят с содержаниями Na_2O и FeO , а также с отношением $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Исходя из этого, мы построили для выделенной группы Логойских стекол соответствующие диаграммы Na_2O - Al_2O_3 и $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ - Al_2O_3 (рис. 9,10). Из диаграмм следует, что, действительно, испарительные тенденции, выявленные в эксперименте, повторяются в стеклах данной выборки, а именно, содержание Na_2O в стеклах ниже, чем в гранито-гнейсовых породах, и уменьшается с ростом содержания Al_2O_3 , а отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ во всех стеклах выше, чем в мишени. Что касается содержания FeO (рис.11), то здесь не наблюдается его понижения по сравнению с содержанием в исходной породе. Однако данное наблюдение не может быть однозначно истолковано как отсутствие признаков испарения железа, так как содержание FeO в мишенных породах Логойского кратера имеет очень широкий разброс значений. Таким образом, выявленные в эксперименте особенности испарения кислых и средних по составу распла-

вов вполне могут быть использованы в целях идентификации импактных стекол, претерпевших при своем образовании селективное испарение.

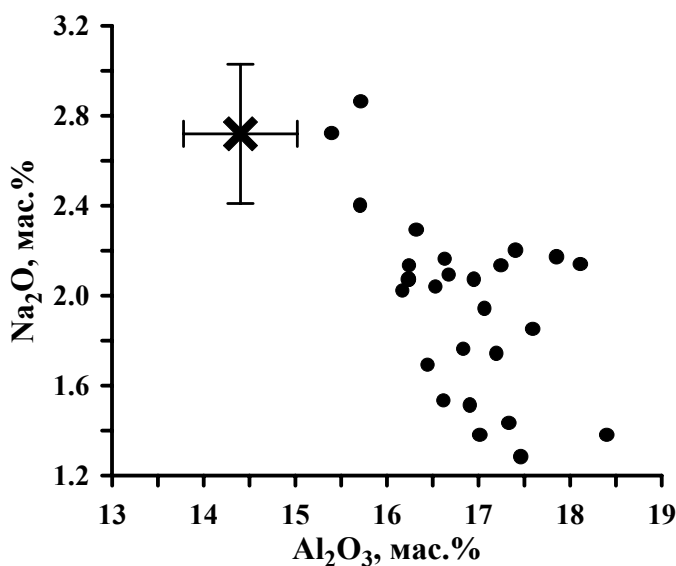


Рис. 9

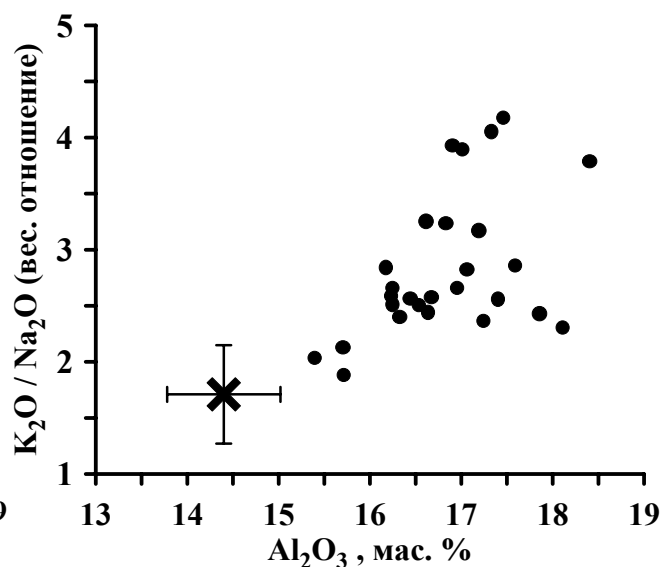


Рис. 10

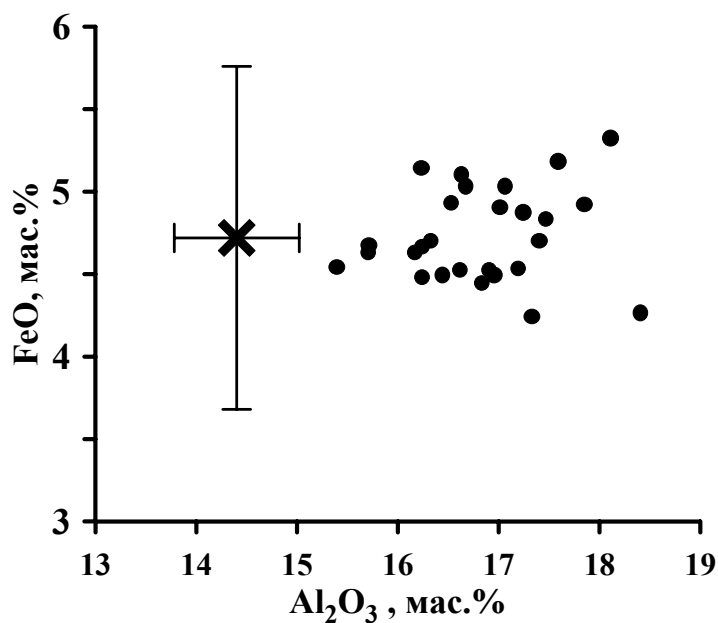


Рис. 11

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (по проекту № 01-05-64564-а)

Литература

- [1] Парфенова О.В., Яковлев О.И., Косолапов А.И. Некоторые закономерности испарения вещества мишени при метеоритном ударе // Вестник Московского Университета. 1976. № 3. С. 52-66.
- [2] Базилевский А.Т., Флоренский К.П., Яковлев О.И., Иванов Б.А. и др. О преобразовании планетного вещества в высокоскоростном ударном процессе // Геохимия. 1982. № 7. С. 946-959.

- [3] Базилевский А.Т., Иванов Б.А., Флоренский К.П., Яковлев О.И. и др. Ударные кратеры на Луне и планетах. М. Наука. 1983. 200 стр.
- [4] Фельдман В.И. Петрология импактитов. Изд. Московского Университета. 1990. 297 стр.
- [5] Gerasimov M.V., Ivanov B.A., Yakovlev O.I., Dikov Yu.P. Physics and chemistry of impacts // In: Laboratory Astrophysics and Space Research. 1999. P.279-329. P.Ehrenfreund et al. (eds.). Kluwer Academic Publishers.
- [6] Яковлев О.И., Диков Ю.П., Герасимов М.В., Влотцка Ф. Особенности испарения алюминия из силикатных расплавов // Геохимия. 1997..№ 12. С. 1181-1195.
- [7] Глазовская Л.И., Громов Е.И., Парфенова О.В., Илькевич Г.И. Логойская астроблема М. Наука. 1991. 134 стр.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(21) 2003

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2003 года (ЕСЭМПП-2003)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2003/informbul-1/planet-5.pdf

Опубликовано 15 июля 2003 г.

© Отделение наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2003

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на "Вестник Отделения наук о Земле РАН" обязательна