

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СОСТАВ СТЕКОЛ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

© 2003 г. О. И. Яковлев*, Ю. П. Диков**, М. В. Герасимов***, Ф. Влотска****, Й. Хут****

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
119991 ГСП-1 Москва, ул. Косыгина, 19. e-mail: yakovlev@geokhi.ru

**Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
109017 Москва, Старомонетный пер., 35. e-mail: dikov@igem.msk.su

***Институт космических исследований РАН
117810 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32. e-mail: mgerasim@mx.iki.rssi.ru

****Институт химии им. М. Планка. 3060, D-55020, Майнц, Германия. e-mail: wlotzka@mpch-mainz.mpg.de

Поступила в редакцию 15.08.2001 г.

Приводятся результаты экспериментов по имитации ударного плавления, разбрызгивания и смешения расплавов хондритового ударника и мишеней – аналогов материковых и морских пород Луны. Анализ сферул стекла показал, что их состав определяется: а) сплавлением в различных пропорциях разнородных в химическом отношении веществ ударника и мишени; б) селективным испарением компонентов расплава. Селективное испарение проявляется в уменьшении содержания в стекле умеренно летучих Si и, особенно, Fe. Содержание последнего уменьшилось в среднем в 2 раза. Столь значительные потери Fe успевают пройти за ~0.01 сек. Испарение Fe приводит к росту магнезиальности стекла. Сравнение петрохимических свойств экспериментально полученных стекол с так называемыми “первичными” стеклами Луны вулканического генезиса показывает, что составы последних могут быть воспроизведены в ударном процессе.

Как известно, основная масса стеклянных частиц реголита Луны образовалась в результате ударного плавления ее пород. Сложная комбинация перемешивания расплавов различных веществ, включающих частично и вещество ударников – метеоритов и, возможно, комет [1], обусловила широкие химические вариации состава лунных стекол. Считается, что в процессе высокотемпературного плавления могла происходить модификация состава стекла при частичном испарении ряда элементов (например, Si, Na, K, Rb [2–4]). Кроме импактных образований в реголите была выделена особая группа мафических или “первичных” стекол (часто обозначаемые в литературе как зеленые (низкотитанистые) и оранжевые (высокотитанистые)), которым, в силу их особых физических и химических свойств, приписывают вулканическое происхождение. В настоящее время принято, что они образовались при “фумарольной” деятельности на Луне: прорыв газа базальтовой магмы инициировал фонтанирование, разбрызгивание и диспергацию расплава, что, в конечном счете, привело к возникновению стеклянных сферул [5–11]. Эти стекла имеют важное петрогенетическое значение, поскольку считается, что они отражают состав наиболее примитивного вещества Луны. Предполагается, что базальтовая магма поступила из зоны нижней мантии, не испытавшей глобальной дифференциации

[12–17]. Для зеленых стекол, которые в большей степени несут информацию о составе первичного вещества лунных недр, характерно относительно высокое отношение Mg/Al и Mg/(Mg + Fe), повышенное содержание Ni, а также “первичное” соотношение REE, почти повторяющее хондритовое, и малая европиевая аномалия [9, 14]. Все выше перечисленные признаки входят в список так называемых критериев “первичности” [6], комплексное использование которых позволяет исследователям выделять в реголите внеимпактные образования. Важной особенностью зеленых и оранжевых стекол является высокое содержание летучих Zn, Ge, Cd, Pb, Sb, Au, Ag, In, S, Cl, F на поверхности сферул по сравнению с внутренней частью. Например, превышение содержания для Cd, Sb, Au составляет $\geq 10^2$ раз [18]. Считается, что обогащение летучими элементами происходит при испарении базальтового расплава с последующей конденсацией пара в ходе вулканической эксплозии [7, 18, 19].

Хотя вулканическая природа мафических стекол полагается общепризнанной, время от времени высказываются мнения о возможности образования их в ударном процессе [20–23], поскольку не все факты укладываются в фумарольно-вулканическую модель. Например, Е. Роддер и П. Вейблен [20] приводят ряд доводов, доказывающих импактное происхождение зеленого и оран-

жевого стекла. Авторы считают, что стекла образовались в условиях чрезвычайно высокой скорости закалки (по их оценкам $\geq 1000^\circ/\text{сек}$), что невозможно в вулканическом процессе, а более характерно для ударного плавления с последующим разлетом капель расплава и закалки за счет радиационной потери тепла. Интересно отметить, что авторы импактной гипотезы предполагают удар метеорита в жидкую среду. Это, по их мнению, может обеспечить высокую как физическую, так и химическую гомогенность наблюдаемых стекол. Удар же метеорита по твердой мишени должен давать стекло с примесью ксеногенного материала. Впрочем, Е. Роддер и П. Вейблен не исключают образования гомогенных стеклянных сферул при крупных ударах, продуцирующих большие массы гомогенного расплава и его диспергированные выбросы. Авторы обращают также внимание на редкость, а в большинстве случаев отсутствие в стеклянных сфералах пузырьков газа, которые должны были бы присутствовать в стекле при фумарольном разбрызгивании расплава. Доводы Е. Роддера и П. Вейблена против вулканической гипотезы кажутся справедливыми, если иметь в виду исключительно низкое содержание летучих в лунном веществе. Суммарное содержание S, Cl, C, N, H в планетарном чехле Луны составляет всего 0.047 мас. % [24]. Согласно теоретическим оценкам высота фонтана базальтового расплава в сотню метров требует содержания газа в расплаве на порядок больше. Лишенная газа базальтовая магма может дать фонтан высотой всего лишь несколько десятков сантиметров [25].

Сторонники вулканизма считают, однако, что на ранней стадии истории Луны магма, поступающая с больших глубин, была насыщена летучими. Об этом свидетельствует, по их мнению, ярко выраженная пузырчатая или пенообразная (frothy-looking) текстура некоторых образцов базальтовых лав [26]. Но текстура данных образцов, как показывают многочисленные анализы, никак не скоррелирована с содержанием в них газовых компонентов. Пузырчатые базальты, в которых находятся газовые включения – “узники”, содержат газов, таких как H_2 , N_2 , CH_4 , CO, CO_2 , не больше 10^{-6} вес. % [27]. Происхождение пузырчатых текстур, по-видимому, связано не с газонасыщенностью базальтов, а отражает скорее процесс “вскипания”, который можно наблюдать в базальтах с низким содержанием газа при плавлении в условиях вакуума.

В работе Р. Фудали и др. [23] критически рассмотрены так называемые физические и химические критерии, которыми широко пользуются исследователи для отделения вулканических и импактных стекол. Авторы показали, что комплекс свойств, характерных для “вулканических” сте-

кол, таких как отсутствие в них шлиров и инородных включений, химическая гомогенность, равномерное распределение Ni, низкое содержание труднолетучих сидерофилов, высокое Mg/Al отношение, сконцентрированность на поверхности стекла летучих элементов, возможность выстраивания химических анализов в последовательные ряды фракционной кристаллизации или частичного плавления, – все эти критерии “вулканизма” можно объяснить и в рамках модели метеоритного удара. Отсюда вполне резонно заключить, что поскольку в реголите Луны невозможно однозначно выделить вулканические стекла, то сама идея эксплозивного механизма выноса примитивного мафического материала требует переоценки.

Как отмечалось выше, специфический состав конденсатных образований на поверхности зеленых и оранжевых стекол берется в качестве важного признака мантийной генерации магмы на Луне. Однако альтернативный подход к объяснению состава конденсата и предположение о привносе летучих хондритовым ударником появились сразу же после обнаружения этих стекол в материале Apollo 15 и Apollo 17 [21]. Принятие данного предположения автоматически означало, что присутствие летучих хондритовых компонентов может быть в принципе обнаружено в конденсате любого образца лунного реголита. Действительно, полученные в последнее время новые данные подтверждают эту точку зрения. В работе Ю.П. Дикова и др. [28] описано слоистое конденсатное покрытие на поверхности частиц реголита Луны-16. Покрытие в отдельных зонах было обогащено Zn (до 4 ат. %), а также Cd, Pb, Ga, P и Cl (до 0.1–0.2 ат. %). Так как образец содержал всего ~10% стеклянных сферул, а их состав лежал вне поля “вулканических” стекол, то вулканическое происхождение образца и, как следствие, “фумарольная” природа конденсатного образования была отвергнута. В зоне конденсата мощностью ~0.3 мкм была обнаружена высокая концентрация углерода (до 60 ат. %), который присутствовал в основном в формах наноалмаза и графита. Данный слой был бронирован слоем силикатного конденсата. Все эти факты нашли естественное объяснение в рамках представлений о конденсации слоев из богатого углеродом газо-парового облака, возникшего при ударе хондритового тела или кометы.

В пользу ударного механизма образования конденсатов и их стеклянных носителей свидетельствует и обнаружение муассанита ($\alpha\text{-SiC}$) на поверхности оранжевых стекол (обр. 74220) [29]. Важность находки состоит в том, что данная фаза образуется, как правило, в экстремально высокотемпературных условиях ($>2000^\circ\text{C}$) [30], которые не могут быть развиты в вулканическом процессе. Таким образом, один из важнейших критериев “первичности” оранжевых стекол, а именно обо-

гашенность их поверхности элементами вулканических фумарол, может быть оспорен и объяснен в свете импактной гипотезы.

Изучение конденсатных образований на поверхности частиц лунного реголита, а также приведенные выше аргументы против вулканического происхождения зеленых и оранжевых стекол привели авторов настоящей статьи к необходимости критического анализа основных критериев так называемой “первичности”. Надо подчеркнуть, что постановка данного вопроса не относится к категории частной геохимической проблемы, а затрагивает коренной вопрос начального состава Луны, как космического тела.

В целях изучения возможных изменений состава капель расплава при ударном плавлении сложных по составу мишеней, а также проверки известных интерпретаций образования импактных и вулканических стекол на Луне мы провели модельные эксперименты по импульсному плавлению смесей пород, имитирующих взаимодействие при ударе вещества хондрита с вероятными мишенными породами Луны – анортозитовыми габбро и Ti-базальтами.

Характеристика исходных смесей и параметры модельных экспериментов. Состав капель расплава зависит от исходного соотношения массовых долей веществ ударника и мишени в конкретной локальной области пространства расплава, образующегося в ударном процессе. Хотя на сегодняшний день модель взаимного перемешивания веществ ударника и мишени отсутствует, при постановке настоящего эксперимента необходимо было, пусть в грубом приближении, определить относительно пропорций масс базитовой мишени и хондрита. Известно, что при высокоскоростных соударениях происходит плавление и испарение как материала мишени, так и ударника. С ростом скорости соударения соотношение масс пара и расплава возрастает, а при некоторых пороговых значениях скорости ударник полностью переходит в пар [31, 32]. При полном испарении ударника примесь его вещества в остаточном расплаве может быть пренебрежимо малой. С другой стороны, с уменьшением скорости соударения доля ударника в ударном расплаве должна возрастать и, вместе с тем, должна возрастать вероятность проявления метеоритной контаминации в импактатах. Предполагая, что особенности химического состава зеленых и оранжевых стекол обусловлены изрядной примесью метеоритного вещества, мы сочли важным рассмотреть в эксперименте случай перемешивания ударного расплава с достаточно высокой долей вещества ударника. Согласно расчетным данным [33, 34] при скорости соударения ~5–7 км/сек соотношение расплавленных масс хондритового ударника и базитовой мишени составляет ~1 : 1. Взяв за ос-

нову эту оценку, мы приготовили смеси, в которых вещество ударника и вещества мишени имели примерно те же пропорции масс. Из выше сказанного следует также, что импульсное плавление таких смесей автоматически подразумевает имитацию условий ударного плавления при относительно низких скоростях удара.

Первая смесь имитировала “удар” (т.е. быстрое плавление, перемешивание и испарение) хондритового ударника по “материковой мишени” и состояла из двух главных частей – анортозитового габбро и углистого хондрита Murchison (CM2). Анортозитовое габбро имело состав (мас. %): SiO₂ 42.86; TiO₂ 0.05; Al₂O₃ 26.72; Fe₂O₃ 1.50; FeO 3.99; MnO 0.09; MgO 8.27; CaO 14.31; Na₂O 1.26; K₂O 0.11; P₂O₅ 0.01; п. п. п. 0.93; Σ 100.10. Смесь была тщательно перемешана и растерта в яшмовой ступке до размера частиц ~1–5 мкм. Для увеличения содержания Ti в смесь было добавлено незначительное количество сфена (CaTiSiO₅), которое составляло 4.9% от общей массы смеси. Примесь сфена, кроме того, служила своеобразной титановой меткой, которая позволяла оценивать степень перемешивания расплава при импульсном плавлении. Состав смеси был рассчитан исходя из весовых долей и известных составов анортозитового габбро, сфена и хондрита Murchison. Анализ последнего был взят из сводки метеоритных составов Е. Ярошевича [35]. Содержание главных элементов в исходной смеси составило (мас. %): Si 18.4; Ti 1.3; Al 7.7; Mg 9.4; Fe 14.8; Ca 6.9; O 41.5.

Вторая смесь имитировала “удар” хондритового ударника по “морской мишени” и также состояла из двух частей – титанистого базальта и хондрита Murchison. Ti-базальт имел состав (мас. %): SiO₂ 49.00; TiO₂ 3.06; Al₂O₃ 13.66; FeO 17.39; MnO 0.19; MgO 3.97; CaO 7.44; Na₂O 4.72; K₂O 0.81; P₂O₅ 0.09; Cr₂O₃ 0.03; п. п. п. 0.00; Σ 100.36. Рассчитанное содержание главных элементов в исходной смеси составило (мас. %): Si 20.4; Ti 1.0; Al 4.4; Mg 8.8; Fe 21.0; Ca 3.5; O 40.9.

Импульсное плавление смесей было выполнено на лазерной установке со следующими характеристиками: 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 лазерного пучка составляла ~4000 К [36]. Образец с запрессованной смесью (таблетка $d = 1$ см) 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

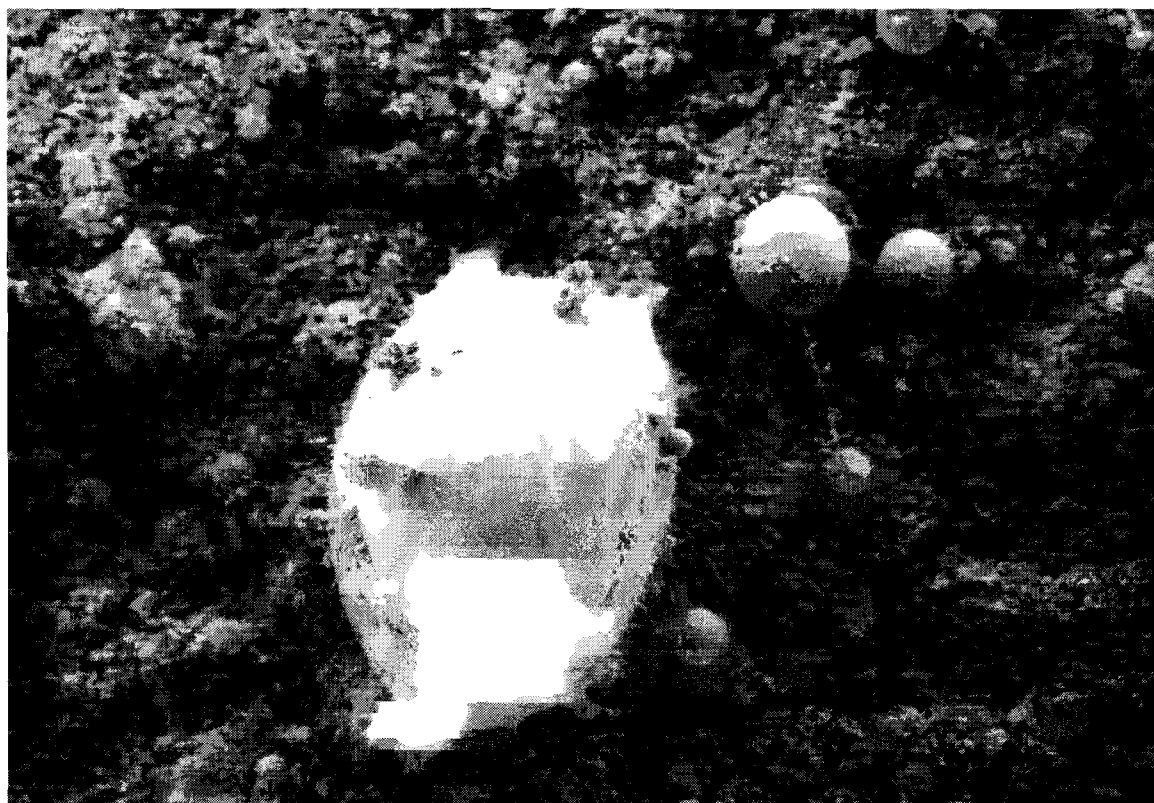


Рис. 1. Сферулы стекла на поверхности конденсатного покрытия. Диаметр самой крупной сферулы ~15 мкм.

экран, на поверхности которого происходила конденсация пара и закалка расплава. Опыт со смесью Тi-базальт – Murchison был проведен с меньшим диаметром фокусировки лазерного пучка (~2 мм), что предопределило здесь большую долю высокотемпературного материала.

Образование капель расплава (после заковки – сферулы стекла) объясняется диспергацией расплава, выброшенного под давлением струи испаренного пара из кратерной полости образца. На рис. 1 показан обычный вид стеклянных сферул, диаметр которых находится в пределах от 0.5 до 20 мкм. Диаметр основной массы сферул (~90%) попадал в интервал 0.5–1.5 мкм. Следует обратить внимание, что размер сферул был по большей части близок минимальному размеру частиц исходной смеси. На поверхности некоторых сферул наблюдались ликвационные выделения металлического железа (рис. 2). Здесь также хорошо видна микроглобулярная структура конденсата с характерным размером глобул ~500 Å.

Поскольку замысел экспериментов состоял в моделировании ударного процесса, то естественно возникает вопрос: каким скоростям соударения соответствуют параметры проведенных опытов. Здесь возможны лишь грубые оценки. Упрощенный подход решения состоит в предположении, что диаметр пятна фокусировки (3 ± 1 мм) равня-

ется диаметру воображаемого ударника. Тогда при данной энергии лазерного импульса (в интервале 10^2 – 10^3 Дж) эксперимент имитировал ударное воздействие при скорости соударения ~4–10 км/сек.

Количественный химический анализ стеклянных сферул на главные элементы (Si, Ti, Al, Fe, Mg, Ca) был выполнен рентгеновским методом на сканирующем электронном микроскопе (метод SEM-EDS). Для анализа выбирались только однородные стекла или участки стекол. Чтобы исключить примесь конденсатного материала, поверхность сферул перед анализом протравливалась ионами Ag^+ . В опыте со смесью анортозитовое габбро-Murchison-сфен было проанализировано 104 сферулы; в опыте со смесью Тi-базальт-Murchison-72.

Результаты обработки аналитических данных. Статистическая обработка результатов анализа показала, что состав стекол заметно отличается от среднего состава смеси. Состав сферул определяется двумя факторами – сплавлением в различных пропорциях разнородных в химическом отношении частиц смеси и селективным испарением компонентов расплава.

Влияние первого фактора хорошо видно на примере вариаций содержания труднолетучих веществ – Al, Ca, Ti в стеклянных сферулах из опыта со смесью № 1 (рис. 3, 4). В опыте с относитель-

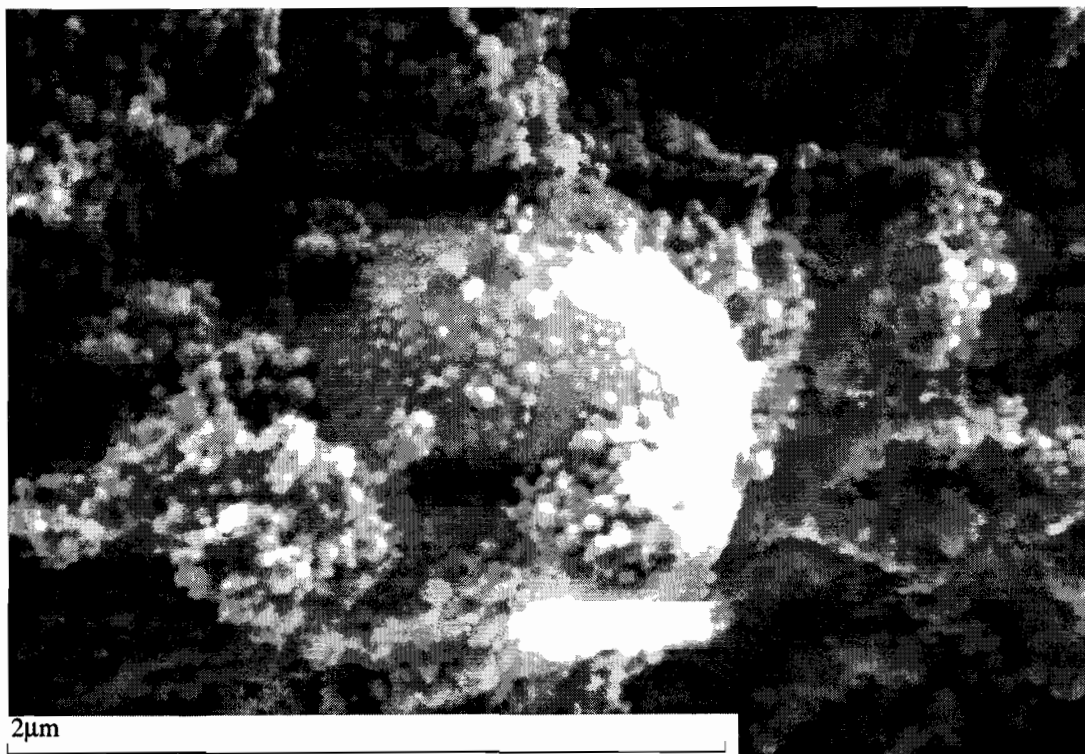


Рис. 2. Сферула стекла ($d = 1.5$ мкм), погруженная в рыхлый, микроглобулярный конденсат. На поверхности сферулы находятся ликвационные выделения металлического железа.

но более однородной и более дисперсной смесью № 2 химические признаки исходных частиц выражены слабее. Можно видеть (рис. 3), что две крайние моды распределения расположены вблизи исходных содержаний Al и Ca в анортозитовом габбро и хондрите. К составу исходной смеси примыкает всего примерно четвертая часть составов сферул. Об отсутствии совершенного перемешивания частиц смеси в жидком состоянии свидетельствуют также данные вхождения сфена и, соответственно, титана в состав стекла (рис. 4). Добавление сфена в смесь привело, как и ожидалось, к резкому увеличению содержания титана в стекле. Однако из-за быстрого плавления и, как следствие, несовершенного перемешивания расплава на гистограмме вокруг содержания титана в исходной смеси группируется лишь ~10% сферул. Основная масса сферул содержит титана заметно меньше исходного. В наиболее представительной популяции сферул содержание титана находится в пределах 0.9–1.2 вес. %, что в пересчете на сфен означает примешивание к расплаву анортозитового габбро и хондрита всего ~2.6 вес. % сфенового расплава. Помимо неполного перемешивания расплава асимметричное распределение титана может быть обусловлено также локальными минерально-химическими неоднородностями в исходной смеси, которые из-за близости размера сферул размеру частиц исходной смеси насле-

дуются при импульсном плавлении. Интересно, что в распределении содержаний более летучих Fe, Si, Mg выделяется только одна хорошо выраженная концентрационная мода, что отражает, по-видимому, высокую диффузионную подвижность этих элементов при перемешивании расплавов (рис. 5, 6, 7, 9, 10).

Второй фактор – селективное испарение компонентов расплава – наглядно проявляется в образовании большой популяции сферул, в которой наблюдается уменьшение содержания умеренно летучих Si и, особенно, Fe по сравнению с их содержанием в исходной смеси (рис. 5, 6, 7). Как видно из рис. 6, 7, содержание железа в наиболее распространенных популяциях сферул упало в 2–3 раза. Примечательно, что практически все сферулы содержат железа меньше, чем хондрит Murchison. Важно отметить, что связанное с испарением изменение состава стекла происходит за очень короткое “время жизни” капле расплава, которое по нашим оценкам не превышает 0.01 сек.

Значительный испарительный вынос из расплава железа и кремния увеличивает в сферулах содержание труднолетучих Ca, Al, Ti. На гистограмме (рис. 8), построенной по результатам анализов опыта № 2, показано распределение отношения суммарных содержаний труднолетучих компонентов расплава к умеренно летучим. Рисунок наглядно демонстрирует превышение данно-

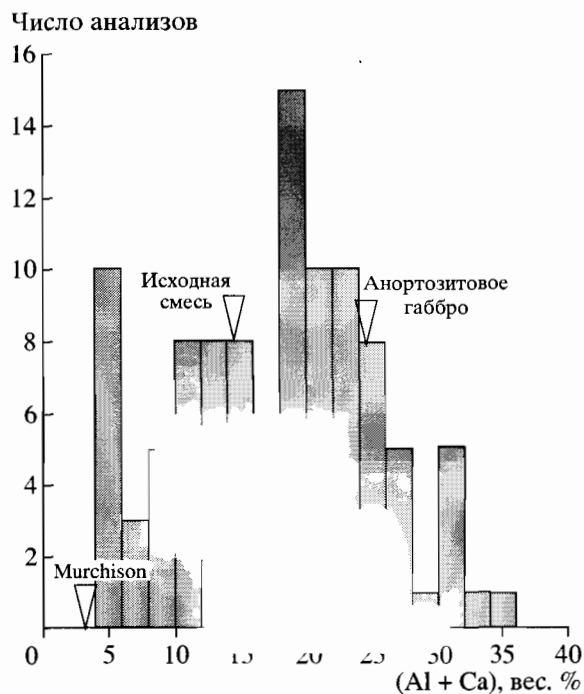


Рис. 3. Распределение содержания (Al + Ca) в сферах стекла из опыта со смесью анортозитовое габбро–Murchison–сфен.

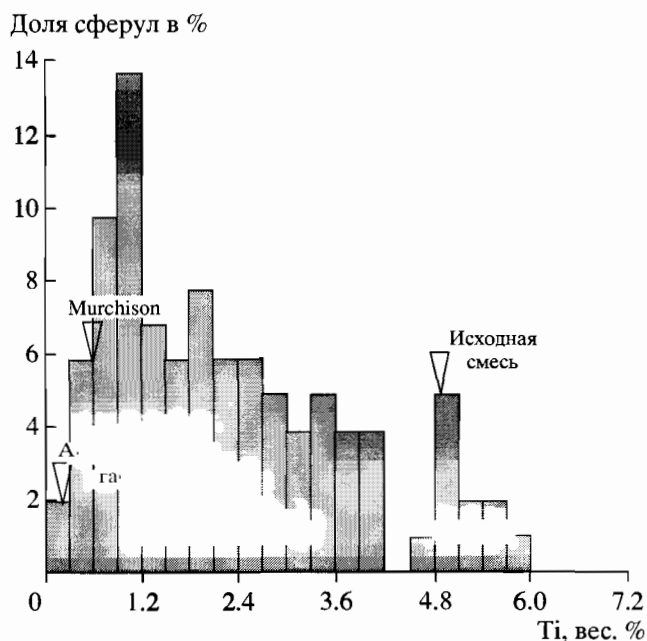


Рис. 4. Распределение содержания Ti в сферах стекла из опыта со смесью анортозитовое габбро–Murchison–сфен.

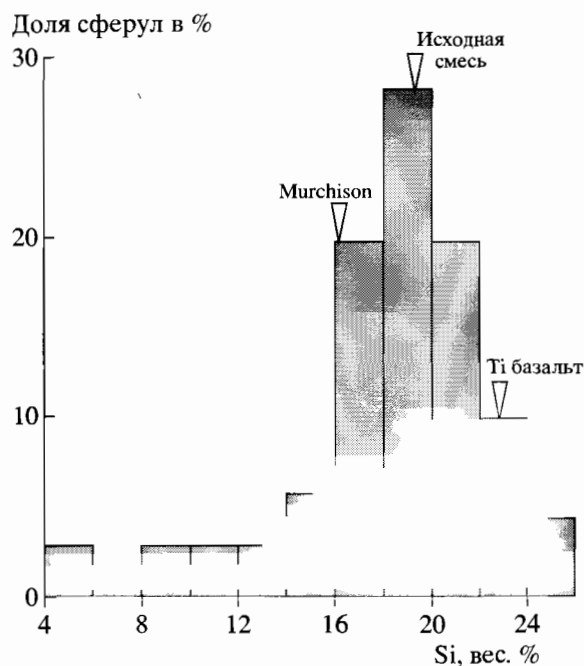


Рис. 5. Распределение содержания Si в сферах стекла из опыта со смесью Ti–базальт–Murchison.

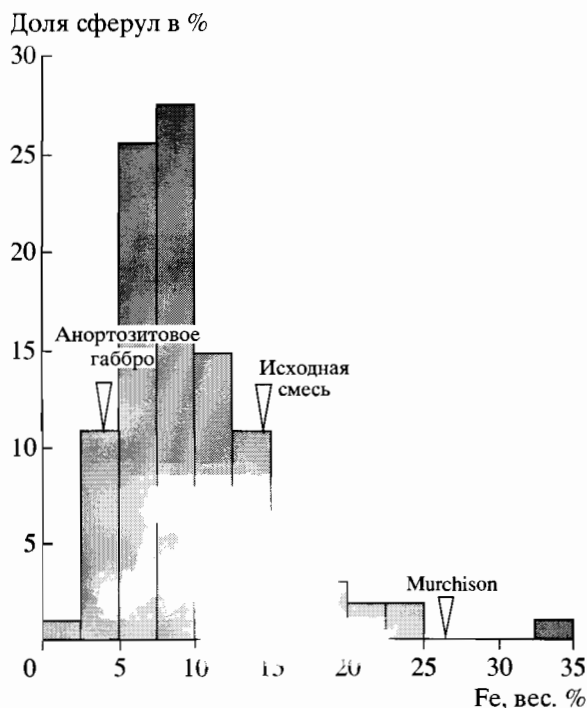


Рис. 6. Распределение содержания Fe в сферах стекла из опыта со смесью анортозитовое габбро–Murchison–сфен.

го отношения в большинстве сферул по сравнению с его значением в исходной смеси.

Примечательно поведение магния, распределение содержания которого свидетельствует скорее

о его накоплении в большинстве сферул. В стеклах опыта № 1 мода содержания Mg группируется в основном вокруг исходной концентрации в смеси (рис. 9), а в стеклах опыта № 2 мода заметно

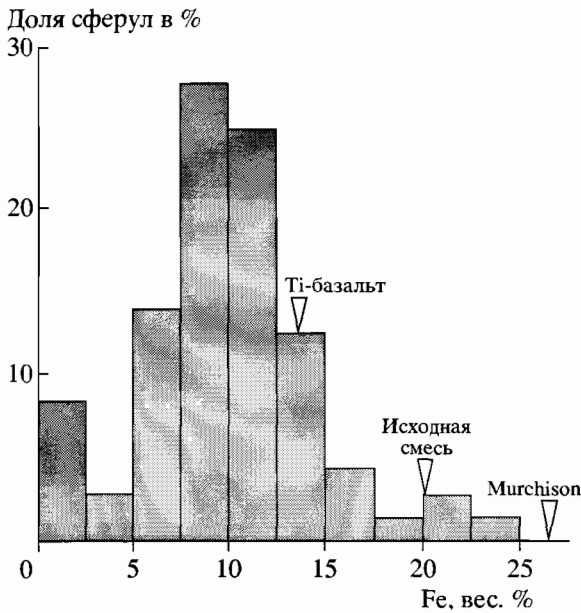


Рис. 7. Распределение содержания Fe в сферах стекла из опыта со смесью Тi-базальт–Murchison.

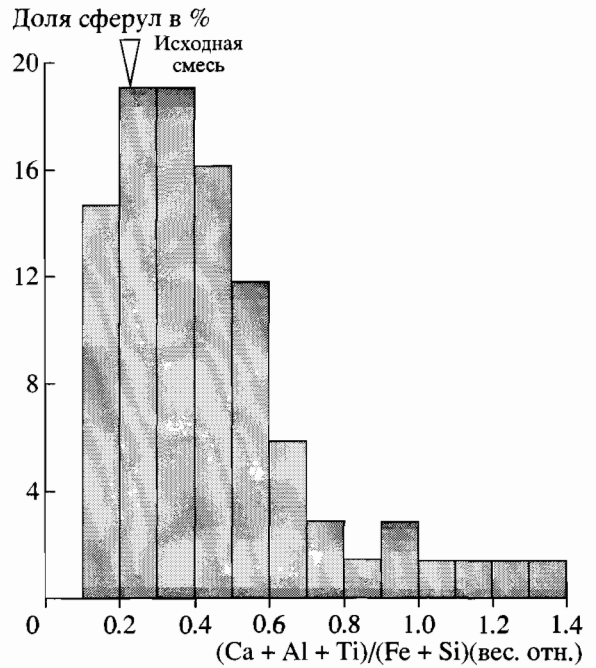


Рис. 8. Распределение отношения $(Ca + Al + Ti)/(Fe + Si)$ в сферах стекла из опыта со смесью Тi-базальт–Murchison.

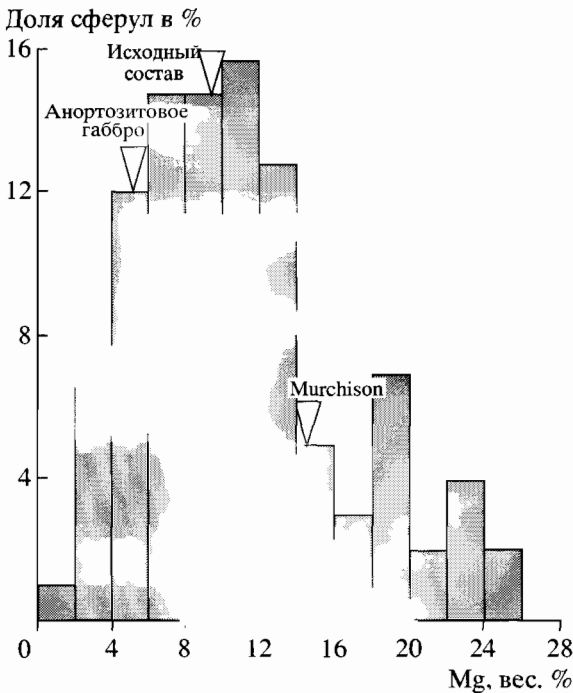


Рис. 9. Распределение содержания Mg в сферах стекла из опыта со смесью анортозитовое габбро–Murchison–сфен.

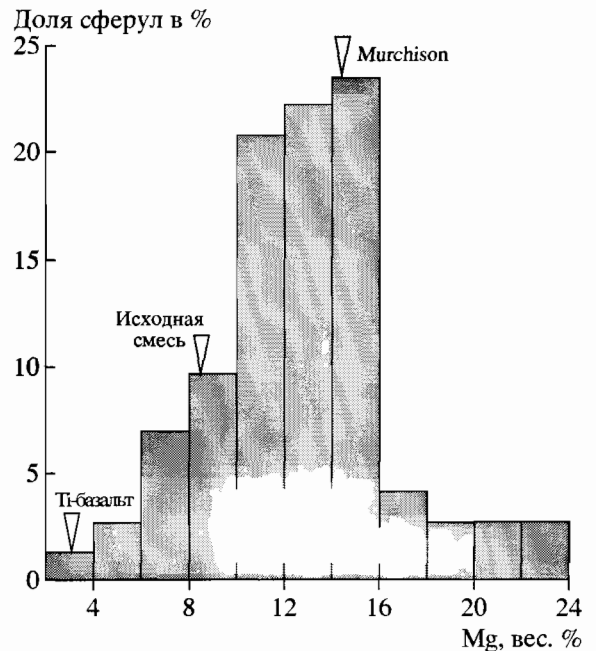


Рис. 10. Распределение содержания Mg в сферах стекла из опыта со смесью Тi-базальт–Murchison.

превышает содержание Mg в исходной смеси (рис. 10).

Резкие различия в испарении Mg и Fe приводят к росту магнезиальности расплава. На рис. 11, 12

приведены гистограммы распределения магнезиальности в сферах стекла. Можно видеть, что по сравнению с исходным значением магнезиальности стекла в среднем возросла на ~10% в опыте

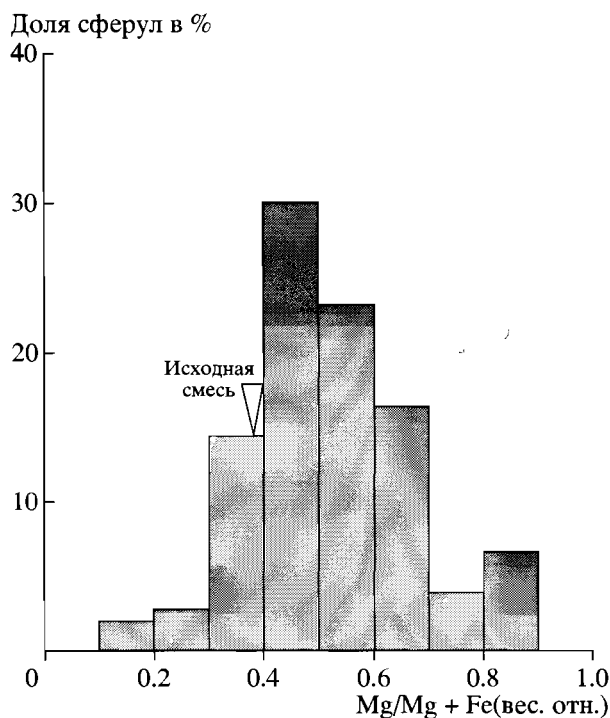


Рис. 11. Распределение отношения $Mg/(Mg + Fe)$ в сферула стекла из опыта со смесью анортзитовое габбро-Murchison-сфен.

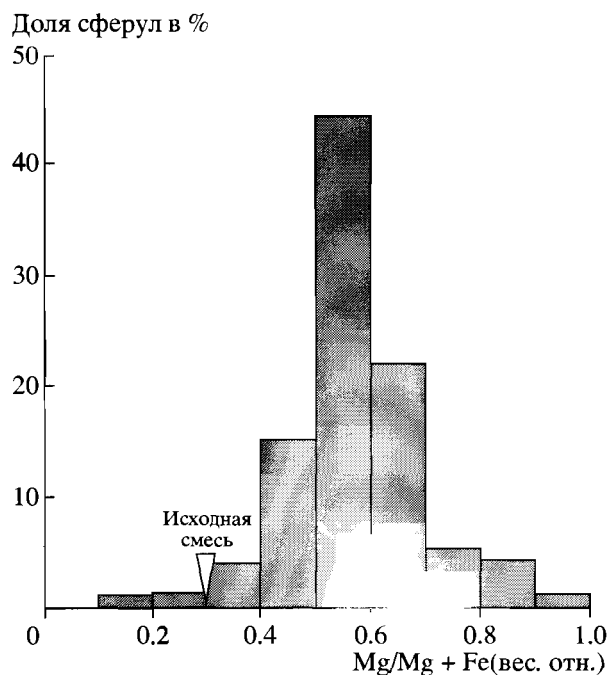


Рис. 12. Распределение отношения $Mg/(Mg + Fe)$ в сферулах стекла из опыта со смесью Тi-базальт-Murchison.

со смесью № 1 и на ~25% в опыте со смесью № 2. Таким образом, потери железа при испарении могут значительно изменить важнейшую характеристику расплава, широко используемую в петрогенетических построениях.

Особенности процесса испарения железа. Как видно из выше представленных данных, наиболее кардинальные изменения состава расплава связаны с испарительными потерями железа. Эти данные лишней раз подтверждают высокую способность железа к испарению при высокой температуре. Она очевидно выше по сравнению с кремнием, что находится в полном соответствии с экспериментальными наблюдениями по температурной последовательности испарения петрогенных компонентов из силикатных расплавов [37-40]. В опытах, проведенных в квазиравновесных условиях, активная фаза испарения железа находится в интервале температур ~1500-1600°C. Она наступает после испарения К и Na (~1100-1300°C) и затухает с наступлением активной фазы испарения кремния (~1650-1850°C). При температурах выше 1600-1700°C железо практически полностью выносится из расплава [40, 41]. Необходимо отметить, что прямое использование приведенных здесь температурных значений для описания испарения в импульсном режиме плавления не может быть вполне корректным, так как в случае быстрого нагревания и короткого "времени жизни" расплава испарительные потери компонентов

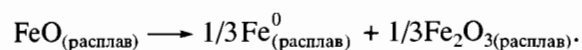
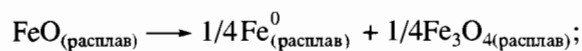
резко сокращаются, в результате чего температурные условия расплава могут не соответствовать его равновесным составам.

Изучение морфологии поверхности сферул дает материал для раскрытия механизма испарения железа и позволяет понять причину его высокой относительной летучести. На рис. 2 показан частот встречающийся вид поверхности сферул, большую часть площади которой занимают ликвидационные микровыделения металлического железа. Образование металла, то есть восстановление из первоначально закисной формы, выделение в виде рассеянных кластеров, собирание и обособление в объеме силикатного расплава происходит, по нашим наблюдениям, практически мгновенно, а точнее за время порядка сотой доли секунды. При этом основная часть железа успевает испариться, а большинство стеклянных сферул "очиститься" от металлических ликватов. Процесс ускоренного испарения железа, несомненно, сопряжен с его металлизацией и испарением в нульвалентной форме, что неоднократно описано в различных экспериментах с силикатными расплавами, проведенных при высокой температуре в восстановительной среде или в вакууме [38-43]. Железо при перемене валентного состояния формирует расплав металла, испарительная способность которого значительно возрастает по причине резкого увеличения упругости пара железа. В интервале температур 1300-1700°C упругость пара ме-

таллического железа на 6 порядков превышает суммарное равновесное давление газо-паровой смеси железа и кислорода над FeO [44].

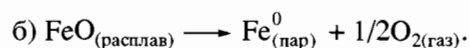
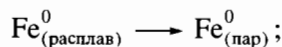
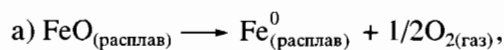
Надо сказать, что механизмы восстановления, сепарации металла и испарения железа еще не достаточно хорошо изучены. Обобщая известные нам экспериментальные наблюдения за испарением железа из силикатных расплавов, можно констатировать, что схемы восстановления и испарения железа из хондритового вещества и базальтового расплава могут существенно различаться. Образование части металлического железа в веществе хондрита происходит при относительно низкой температуре и при участии "внутренних" восстановителей – углерода и серы. В расплаве базальта образование металлической формы железа происходит в процессе термовосстановления. По данным А. Хашимото и др. [41], восстановление железа в матрице хондрита Murchison начинается уже при $T = 600\text{--}800^\circ\text{C}$, что выражается в исчезновении магнетита и образовании высокожелезистого оливина. Процесс сопровождается выносом газа CO, что явно свидетельствует об участии углерода в окислительно-восстановительной реакции. При дальнейшем нагревании и при $T \approx 1000^\circ\text{C}$ появляется тонкодисперсное металлическое железо. Когда начинается частичное плавление (при $T \approx 1000\text{--}1100^\circ\text{C}$), частицы металла собираются в сферулы, достигая размеров 0.1–1 мкм. На этой температурной стадии возможны два механизма образования металла: а) разложение сульфида (Fe, Ni)S и б) восстановление Fe^{+2} в оливине серой. Последний процесс идет до $T \approx 1400^\circ\text{C}$. О его вероятности свидетельствует синхронный выход из частично расплавленного хондрита газов SO и SO_2 . Параллельно с образованием металла происходит его испарение. При более высокой температуре в интервале $1400\text{--}1600^\circ\text{C}$, после исчерпания восстановителя, происходит уже прямое испарение железа непосредственно из силикатного вещества.

В работе [38] А. Хашимото представил экспериментальные данные о высокотемпературном ($T = 1800^\circ\text{C}$) испарении железа в системе $\text{FeO-MgO-SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$. В силикатном расплаве с ростом испарительных массопотерь наблюдалось увеличение содержания трехвалентного железа. По мнению автора, при высокой температуре расплава происходит более быстрый выход в пар частиц Fe^0 по сравнению с кислородом, задержка которого в расплаве приводит к окислению оставшегося в расплаве железа. Предлагается следующая схема реакции диспропорционирования:



Это интересное наблюдение, тем не менее, не подтверждено пока ни в экспериментах других авторов, ни на материале изучения импактных стекол.

Существенное отличие хондритового и базальтового вещества, определяющее появление металлического железа и его испарение, заключается в отсутствии в последнем явных признаков "внутреннего" восстановителя. При образовании ликватов металла в базальтовом стекле обычно предполагается присутствие восстановителя (например, графита в первичной лунной магме [11]). В лабораторных условиях для получения металла в базальте прибегают, как правило, к внесению "внешнего" восстановителя и проводят опыты либо в восстановительной газовой среде-буфере, либо в восстановительном тигле [45, 46]. Но для образования металлического железа в базальте вовсе не требуется вещество восстановитель, так как процесс может проходить не по схеме окислительно-восстановительной реакции, а по схеме простого термовосстановления. Здесь возможны два варианта восстановления и испарения железа, условия реализации которых пока слабо изучены:



Первый вариант испарения предполагает промежуточную стадию процесса – образование ликватов железа. По нашему мнению, появление металла в силикатном расплаве определяется кинетикой процессов восстановления и испарения, которая, прежде всего, находится в зависимости от температуры. Если скорость испарения железа не велика по сравнению со скоростью восстановления и сегрегации металла, то процесс может развиваться по первому варианту. Вероятно, он более эффективен при относительно низких температурах и при малой продолжительности плавления. С увеличением длительности процесса ликваты железа исчезают при испарении. Наш опыт работы с высокотемпературными базальтовыми расплавами показывает, что никаких визуальных наблюдаемых выделений металлического железа в стеклах, полученных при длительном (порядка первых минут и более) испарении в высоком вакууме, нет. С другой стороны, в высокотемпературных опытах с малой длительностью испарения (меньше секунды) [47, 48], а также в опытах, проведенных в условиях низкого вакуума, в силикатном расплаве фиксировались капли металла [49]. Последняя ссылка относится к опытам плавления базальта при максимальной температуре $2400\text{--}3000^\circ\text{C}$, длительности в пределах 1–10 мин и давлении в окружающей среде ≤ 1 мм рт. ст. В этих условиях наблюдалось восстановление

железа и сегрегация металла в сферулы до размеров ~ 0.15 мм. Несмотря на высокую температуру, металлическое железо находилось в базальтовом расплаве в течение нескольких минут. Столь “высокая живучесть” ликватов объясняется низкой скоростью испарения железа в условиях относительно плотной окружающей среды газа. Продолжение плавления базальта приводило, в конце концов, к полному исчезновению ликватов вследствие испарения железа.

Второму варианту испарения благоприятствует высокая температура расплава, высокий вакуум и длительность процесса. Возможно, что промежуточная стадия металлизации железа в расплаве все же происходит, но, в силу высокой скорости испарения, железо просто не успевает собраться в крупные ликваты. Более предпочтительной, однако, представляется схема полной диссоциации закиси железа на элементы сразу при переходе в состояние пара. В пользу этой схемы свидетельствуют данные по высокотемпературной масс-спектрометрии паров над вюститом [50] и силикатными расплавами [39, 40].

В экспериментах [39, 40] при температурах предельно высоких для испарения железа ($T \approx 1600\text{--}1700^\circ\text{C}$) наблюдалось, что кроме формы Fe^0 в парах присутствует также форма FeO . Ее доля в парах железа в области указанных температур составляет $\sim 1\%$. Важно отметить, что с ростом температуры доля формы FeO возрастает. Возрастание в парах окисных форм с ростом температуры испарения является общим свойством многих окислов [51]. Причину явления следует искать в энергии межатомных и межмолекулярных связей. С позиций термодинамики окисел переходит в парообразное состояние без диссоциации тогда, когда с ростом температуры свободная энергия испарения окисла становится меньше свободной энергии диссоциации. Можно предположить тогда, что при исключительно высокой температуре расплава ($T \geq 1700\text{--}1800^\circ\text{C}$) железо могло теряться в форме FeO , не продуцируя при этом металлической примеси ни в стекле, ни в конденсате.

Все отмеченные выше схемы выделения и испарения железа, так или иначе, должны были проявить себя при образовании сферул в зависимости от температуры, “времени жизни” капли расплава, а также в зависимости от количественного соотношения в ней вещества хондрита и базальта. В определенном смысле термическая и испарительная история каждой сферулы индивидуальна. Тем не менее можно предположить, что для низкотемпературных сферул, содержащих большую долю метеоритного вещества, вероятность выделения и сохранения микроликватов металла выше, чем для сферул, образованных при высокой температуре и содержащих изначально

большую примесь базальтового вещества. Что касается химического состава, то наибольшие значения магнезиальности стекол могут получиться при высокой температуре расплава и при большой доле в расплаве метеоритного вещества, способного терять железо в широком диапазоне температур.

Альтернативный подход к проблеме образования “первичных” стекол на Луне. В обобщающей статье Д. Делано [9], посвященной проблеме поиска наиболее примитивного по составу вещества Луны, обозначены признаки или критерии выделения “первичных” стекол вулканического генезиса. Там же приведены 25 “эталонных” составов зеленых и оранжевых стекол (стекла Делано), отвечающих этим критериям и выделенных из нескольких тысяч стеклянных объектов экспедиций Apollo. По мнению автора, составы стекол перекрывают весь диапазон первичных расплавов, из которых берут начало низкотитанистые и высокотитанистые базальты Луны. Рассмотрим в свете имеющихся экспериментальных данных обозначенные в литературе критерии “первичности”, относящиеся к петрохимии главных элементов.

Прежде всего, сравним “эталонные” составы стекол Делано с составами сферул, полученных в эксперименте. Сравнение относительных содержаний петрохимических пар главных элементов — $(\text{Ca} + \text{Al})\text{--}(\text{Mg} + \text{Fe})\text{--}(\text{Si} + \text{Ti})$ — как в экспериментальных сферулах, так и в стеклах Делано приведено на соответствующих треугольных диаграммах (рис. 13, 14). На треугольниках помещены также валовые составы смесей и их инградиентов. Можно заметить, что положение на диаграмме большей части точек составов сферул и их смещение относительно исходного состава смеси обусловлено селективным испарением кремния и железа. Можно также заметить, особенно на рис. 14, что плотный рой точек составов экспериментальных сферул лежит в области составов стекол Делано. Отсюда естественно сделать вывод, что соотношение главных элементов в составе зеленых и оранжевых стекол легко воспроизводится в эксперименте, имитирующем ударное высокотемпературное плавление смеси лунного базальта с хондритом.

В литературном обзоре статьи отмечалось, что одними из химических критериев выделения вулканических стекол на Луне является их относительно высокая магнезиальность. Она служит обоснованием “первичности” и “мантийности” происхождения расплавов. Однако, как следует из наших экспериментов, природа магнезиальности стекол может иметь другое толкование, не связанное с глубиной вулканизма. В работе [9] проведено сравнение отношения $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ в зеленых и оранжевых стеклах и лунных морских базальтах. Средняя молярная величина этого от-

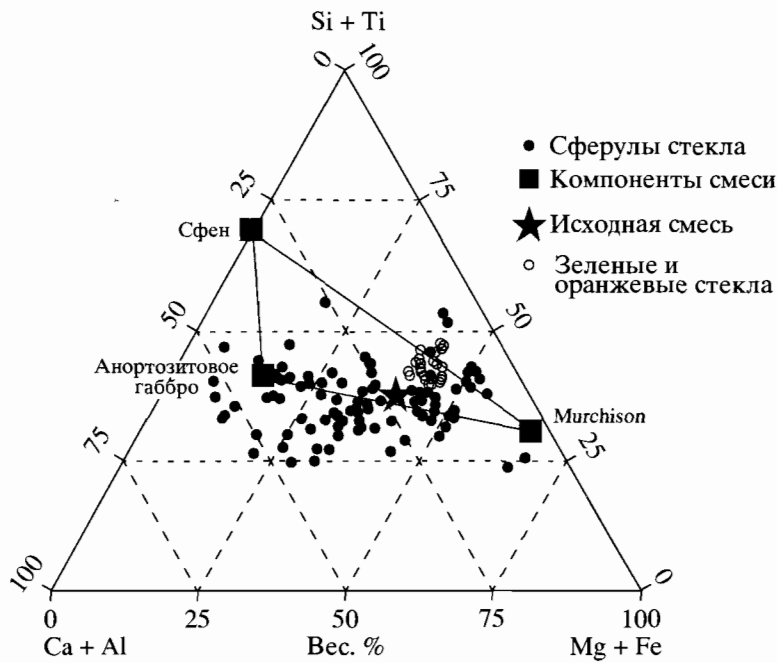


Рис. 13. Составы сферул стекла в сравнении с составом исходной смеси опыта № 1 и “вулканическими” стеклами Делано.

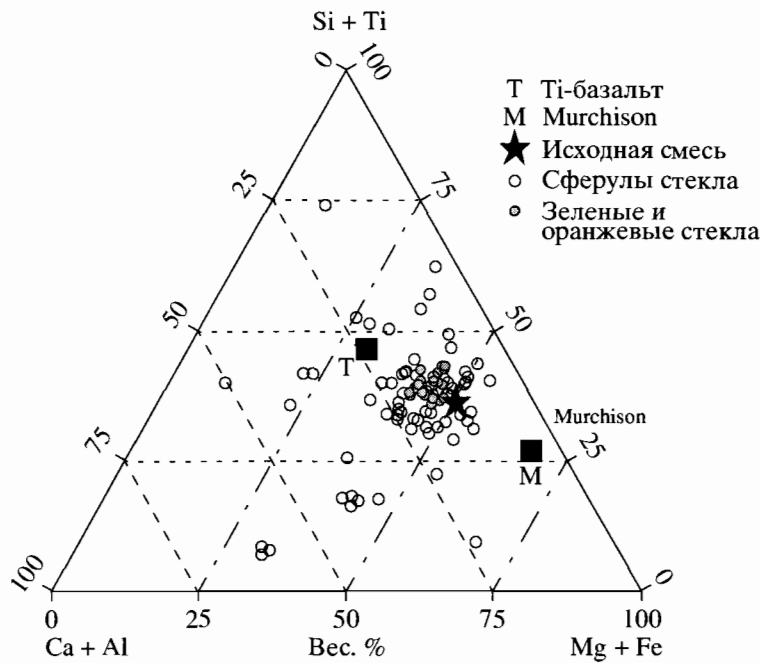


Рис. 14. Составы сферул стекла в сравнении с составом исходной смеси опыта № 2 и “вулканическими” стеклами Делано.

ношения в зеленых стеклах составила 0.61, в оранжевых 0.52, а диапазон магнезиальности морских базальтов находился в пределах от 0.39 до 0.55. В среднем магнезиальность стекол была на ~10% выше, чем морских базальтов. Так как данная петрохимическая характеристика чувствительна к фракционированию кристалл/расплав, то делается вывод о меньшей фракционирован-

ности составов стекол по сравнению с составами морских базальтов. По нашему мнению, такое сравнение является формальным и неубедительным, так как не рассматривается альтернативная причина высокой магнезиальности “первичных” стекол, состоящая в селективном испарении железа. В наших опытах магнезиальность основной массы сферул возрастает на те же 10 и более про-

Сравнение составов стекол, полученных в эксперименте, и стекол HASP

Компонент	Стекла, полученные в эксперименте				HASP
	1	2	3	4	
SiO ₂	34.9	35.4	27.2	30.0	31.01 (1.36)
TiO ₂	0.2	0.3	1.5	2.2	0.82 (0.14)
Al ₂ O ₃	35.7	35.5	31.0	31.2	34.6 (1.30)
FeO	6.4	6.8	8.0	10.0	4.98 (0.81)
MgO	5.3	4.7	15.7	13.1	8.49 (1.00)
CaO	17.1	17.1	15.8	14.6	19.52 (0.54)

Примечание. Составы HASP стекол взяты из работы [3]; число в скобках – 1 стандартное отклонение.

центров и может превышать высокие значения, наблюдаемые в зеленых стеклах.

Предположение об ударном происхождении зеленых и оранжевых стекол скорее подтверждается, чем отрицается наблюдениями форм металлизации железа, которые в основных чертах воспроизводятся в испарительных экспериментах. Несмотря на высокую степень химической гомогенности “эталонных” стекол, которая рассматривается в качестве важнейшего критерия вулканического происхождения, Д. Делано [9] все же отмечает, что по крайней мере в трети из них, возможно, присутствует рассеянное суперпарамагнитное железо, которое обычно образуется в ударном процессе при автовосстановлении Fe⁺² в расплаве. Из-за малого размера тонкодисперсных частиц (~10–100 Å) визуальную обнаружить эту форму железа трудно, но в родственных по происхождению стеклах можно наблюдать относительно крупные выделения. Так, например, в статье [11] описаны оранжевые стекла и их кристаллические эквиваленты – черные сферулы из пробы 74001/2 Apollo 17, в которых содержатся микроликваты железа размером ~1–10 мкм. Интересно, что описанные ликваты находятся, как правило, в положении “узников”, так как расположены внутри сферул нераскристаллизованного стекла или, если сферулы раскристаллизованы, внутри кристалликов оливина. Совершенно очевидно, что для образования таких крупных выделений металла и кристаллизации оливина время охлаждения капле расплава в данном случае было больше, чем для капле расплава, закаленных в гомогенное стекло. По оценкам [52], чтобы в сферуле кристаллизовался оливин, скорость охлаждения капли должна быть <100°/с. Однако, несмотря на длительность процесса, ликваты металла не исчезли при испарении, так как были заблокированы внутри стекла или кристаллов оливина.

Поскольку испарительные потери железа играют главную роль в изменении петрохимических характеристик расплава, возникает вопрос, почему в петрологической литературе не уделя-

ется должного внимания эффекту испарения железа и связанному с ним повышению магнетиальности лунных расплавов? Вероятной причиной невнимания многих исследователей к этой проблеме является, по нашему мнению, ошибочные представления о летучести железа и плохое знание экспериментальных данных об испарении базальтовых составов. В работе Д. Делано и Д. Линдсли [53] без указания литературного источника приводятся совершенно неверные зависимости давления паров петрогенных окислов от температуры. Из приведенных кривых-зависимостей следует, что летучесть металлического железа ниже кремнезема, а это находится в явном противоречии с экспериментальными данными как по испарению элементов и простых окислов [44, 50], так и основных по составу силикатных расплавов. По-видимому, взяв за основу ошибочные данные [53], Д. Делано, в статье [9] о происхождении зеленых и оранжевых стекол, ошибочно относит железо к разряду труднолетучих веществ, наряду с Ca и Al, а Si – к относительно летучим, наряду с K, Na, Rb. Последствия такого подхода очевидны. Признавая возможность испарения и изменения составов лунных расплавов в отношении кремния, Д. Делано в то же время полагает, что содержание железа при этом должно или может быть неизменным. Между тем можно достаточно уверенно утверждать, что если в составе базальтового расплава или стекла замечены признаки испарения кремния, то изменения содержания железа в них должны быть неизбежны и выражены в большей степени, чем у кремния.

Другой пример отрицания эффективного испарения железа из силикатного расплава можно найти в работе С. Шерера и др. [54]. Авторы статьи, исследуя стекла из реголитовой брекчии Apollo-16 с отношением Mg/(Mg + Fe) ≥ 0.90, предложили оригинальное объяснение причин возникновения столь высокой магнетиальности. Авторы считают, что в данном случае потери железа были неизбежны, но они произошли не в результате испарения, а в результате чисто механического отделения ликватов металла в процессе разлета и диспергации расплава. При этом справедливо, на наш взгляд, предполагается, что эффективное выделение большой массы ликватов железа в силикатном расплаве происходит в результате высокотемпературного ударного плавления и автовосстановления. Отрицая механизм испарения железа, С. Шерер и др. ссылаются на данные составов HASP стекол [3], которые, как известно, образовались в экстремально высокотемпературных условиях, приведших к испарительным потерям кремнезема и накоплению труднолетучего глинозема. В этих стеклах содержание FeO составляет ~5 вес. % (таблица), что, по мнению авторов, недопустимо много и поэтому определенно свидетельствует о

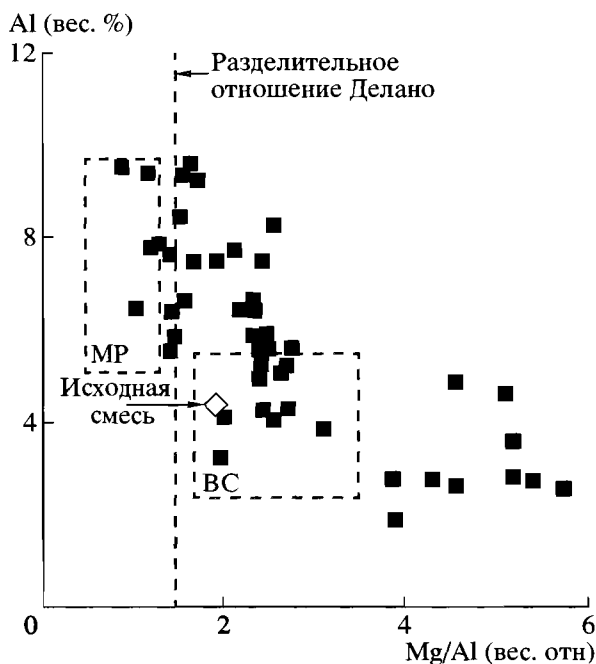


Рис. 15. Диаграмма Al–Mg/Al для сферул стекла опыта № 2 и сравнение положения точек с областями составов морского реголита (MP) и “вулканических” стекол (BC), выделенных Д. Делано [9].

невозможности значительного испарения железа из расплава.

Здесь необходимо привести следующие контраргументы. Во-первых, в литературе имеются данные о низкожелезистых HASP стеклах с содержанием $FeO \leq 1$ вес. % [55]. Во-вторых, содержание каждого компонента в остаточном расплаве определяется при испарении не только индивидуальной летучестью элемента или окисла, но также его начальной концентрацией. Последний фактор в случае малого времени испарительных массопотерь может обеспечить высокое содержание в остаточном расплаве даже относительно летучего компонента. Наглядным примером такого явления служат составы некоторых сферул, полученных в настоящем эксперименте. В таблице представлены составы четырех сферул из опыта № 1, которые также можно отнести к категории HASP, так как они имеют относительно низкое содержание SiO_2 и высокое – Al_2O_3 . Как видно из приведенных данных, стекла содержат очень много FeO (6–10 вес. %), хотя испарение железа из расплава является экспериментально доказанным фактом. Понять причину высокой остаточной концентрации железа не трудно, если иметь в виду, что по сравнению с составом исходной смеси содержание железа в данном стекле упало при испарении в 2–3 раза, тогда как содержание кремния уменьшилось на 2–5%.

В качестве важного критерия “первичности” состава Д. Делано выдвигает отношение Mg/Al ,

которое в оранжевых и зеленых стеклах имеет высокую величину. В литературе можно даже найти установочное значение этого отношения – 1.5 [23]. Если отношение Mg/Al выше 1.5, то стекла – вулканического генезиса, если ниже, то стекла могут быть ударного генезиса. В пределах составов вулканических стекол отношение Mg/Al и содержание Al имеют отчетливо выраженную отрицательную корреляцию, которая интерпретируется как проявление процесса частичного плавления некоторого ультраосновного мантийного субстрата. По предположению Д. Делано, высокое отношение Mg/Al в вулканических стеклах является отражением составов особых, “темных” морских базальтов, области распространения которых были обнаружены орбитальными лунными станциями [9]. Как отмечают критики вулканической гипотезы [23], здесь Д. Делано совершает логическую ошибку, так как указывает на источник вещества с высоким отношением Mg/Al , который может быть задействован в ударном процессе и, тем самым, хорошо объяснить ударное происхождение так называемых “первичных” составов. По нашему мнению, высокое отношение Mg/Al в стеклах, а также отрицательная корреляция данного отношения с содержанием Al являются результатом сплавления в определенных пропорциях лунного базальта и хондрита в ударном процессе. На рис. 15 можно видеть, что экспериментально полученные сферулы имеют отношение Mg/Al как выше, так и ниже 1.5, выстраиваются в регрессию с отрицательным наклоном и охватывают на диаграмме область, которую Д. Делано отводит вулканическим стеклам. Эти данные наглядно показывают, что выбранные по критерию Mg/Al вулканические стекла Делано можно воспроизвести в имитирующем ударное плавление эксперименте, и поэтому данный критерий “вулканизма” не является однозначным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) При импульсном высокотемпературном плавлении смесей аналогов лунных базальтов и хондрита два главных фактора определяют состав стекол – сплавление в различных пропорциях частиц смеси и селективное испарение компонентов расплава.

2) Результаты анализа стекол свидетельствуют, что их составы варьируют в широких пределах и, следовательно, быстрое плавление различных составных частей смеси не приводит к эффективному перемешиванию в жидком состоянии. Данное наблюдение не противоречит, а скорее подтверждает известное представление о причинах разнообразия состава стекол на Луне как об ударно-расплавленной смеси различных составляющих частей реголита.

3) В составах большей части стеклянных сферул обнаруживаются отчетливые признаки селективного испарения. По сравнению с исходным составом смеси в сферулах наблюдается резкое уменьшение содержания Fe и некоторое уменьшение содержания Si при соответствующем увеличении содержания Ca и Al. Интенсивное испарение Fe из высокотемпературного расплава является выжнейшим фактором, формирующим химический состав стекол. Данное наблюдение противоречит распространенному мнению [9], что Fe относится к категории труднолетучих элементов и что в процессах ударного плавления его содержание должно быть неизменно. Важно заметить, что значительные потери Fe при испарении происходят в течение очень короткого "времени жизни" капель расплава, составляющего в условиях эксперимента не более 0.01 сек.

4) Испарительные потери Fe приводят к росту магнезиальности стекла, что придает ему тот химический признак, который рассматривается в литературе по лунной петрологии в качестве одного из основных критериев выделения зеленых и оранжевых стекол или стекол вулканического происхождения, отражающих состав лунной мантии. Данные модельных экспериментов показывают, что составы этих так называемых первичных стекол могут быть ударного генезиса, то есть образоваться при ударном сплавлении вещества хондритового ударника и базальтовой лунной мантии при интенсивном испарении железа.

Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках проекта INTAS Project 97-11084.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gibson E.K., Jr., Moore G.W. Volatile-rich lunar soil: evidence of possible cometary impact // *Science*. 1973. V. 179. P. 69–71.
- Ivanov A.V., Florensky K.P. The role of vaporization processes in lunar rock formation // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 6th. 1975. P. 1341–1350.
- Naney M.T., Crawl D.M., Papike J.J. The Apollo 16 drill core: statistical analysis of glass chemistry and the characterization of a high alumina-silica poor (HASP) glass // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 7th. 1976. P. 155–184.
- Delano J.W. Major-element composition of volcanic green glasses from Apollo 14 // *Lunar and Planetary Science XII (Abstracts)*. 1981. P. 217–219.
- McKay D.S., Clanton U.S., Ladle G. Scanning electron microscope study of Apollo 15 green glass // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 4th. 1973. P. 225–238.
- Heiken G.H., McKay D.S., Brown R.N. Lunar deposits of possible pyroclastic origin // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1974. V. 38. P. 1703–1718.
- Meyer C., Jr., McKay D.S., Anderson D.H., Butler P., Jr. The source of sublimates on Apollo 15 green and Apollo 17 orange glass samples // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 6th. 1975. P. 1673–1699.
- Butler P., Jr. Recognition of lunar glass droplets produced directly from endogenous liquids: the evidence from S-Zn coating // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 9th. 1978. P. 1459–1471.
- Delano J.W. Pristine lunar glasses: criteria, data, and implications // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 16th. 1986. In: *JGR*. V. 91. № B4. P. D201–D213.
- Steele A.M. Apollo 15 green glass: relationships between texture and composition // *Proc. Lunar Planet. Sci.* 1992. V. 22. P. 329–341.
- Weitz C.M., Rutherford M.J., Head III J.W. Oxidation states and ascent history of the Apollo 17 volcanic beads as inferred from metal-glass equilibria // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1997. V. 61. № 13. P. 2765–2775.
- Green D.H., Ringwood A.E. Significance of a primitive lunar basaltic composition present in Apollo 15 soil and breccias // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1973. V. 19. P. 1–8.
- Delano J.W., Livi K. Lunar volcanic glasses and their constraints on mare petrogenesis // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1981. V. 45. P. 2137–2149.
- Рунгвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 293 с.
- Delano J.W., Lindsley D.H. Mare glasses from Apollo 17: constraints on the Moon's bulk composition // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 14th. 1983. In: *JGR*. V. 88. P. B3–B16.
- Hess P. Diapirism and the origin of high TiO₂ mare glasses // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. № 11. P. 2069–2072.
- Hess P. On the source regions for mare picritic glasses // *Jour. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № E2. P. 4347–4360.
- Chou C.L., Boynton W.V., Sunberg L.L., Wasson J.T. Volatiles on the surface of Apollo 15 green glass and trace element distributions among Apollo 15 soils // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 6th. 1975. P. 1701–1727.
- Butler P., Jr., Meyer C., Jr. Sulfur prevails in coatings on glass droplets: Apollo 15 green and brown glasses and Apollo 17 orange and black (devitrified) glasses // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 7th. 1976. P. 1561–1581.
- Roedder E., Weiblen P.W. Apollo 17 "Orange Soil" – a result of meteorite impact on liquid lava? // *Nature*. 1973. V. 244. № 5413. P. 210–212.
- El Goresy A., Ramdohr P., Medenbach O. Lunar samples from Descartes site: opaque mineralogy and geochemistry // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 4th. 1973. V. 1. P. 733–750.
- Morgan J.W., Wandless G.A. 74001 drive tube: siderophile elements match IIB iron meteorite pattern // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 10th. 1979. V. 1. P. 327–340.
- Fudali R.F., Kreuzberger M., Kurat G., Brandstatter F. Aspect of a glassy meteorite from the Moon bearing on some problems in extraterrestrial glass-making // *Journal Non-Crystalline Solids*. 1984. V. 67. P. 383–396.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Бурба Г.А. и др. Очерки сравнительной планетологии. М.: Наука, 1981. 326 с.
- Head III J.W., Wilson L. Basaltic pyroclastic eruptions: influence of gas-release patterns and volume fluxes on fountain structure, and the formation of cinder cones, spatter cones, rootless flows, lava ponds and lava flows // *Journal Volcan. Geotherm. Res.* 1989. V. 37. P. 261–271.

26. French B.M. The Moon book. Peunguin Books. 1977. 287 p.
27. Gibson E.K., Andrawes F. Nature of the gas phases released from lunar rocks and soils upon crushing // Lunar and Planetary Science IX (Abstracts). 1978. P. 379–380.
28. Dikov Yu.P., Ivanov A.V., Wlotzka F. et al. High enrichment of carbon and volatile elements in the surface layers of Luna 16 soil sample 1635: result of comet or meteorite impact? // Earth Planet. Sci. Lett. 1998. V. 155. P. 197–204.
29. Dikov Yu.P., Gorshkov A.I., Sivtsov A.I. et al. SiC and graphite in the sublimate layers of the lunar orange glass spherules // Lunar and Planetary Science XXXIII (Abstracts). 2002. CD-ROM. #1186.
30. Верма А., Кришна П. Полиморфизм и политипизм в кристаллах. М.: Мир, 1969. 274 с.
31. Малама Ю.Г. Численное моделирование высокоскоростного удара по полубесконечной мишени // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1982. № 2. С. 119–125.
32. Cintala M.J. Impact-induced thermal effects in the Lunar and Mercurian regoliths // Journ. Geophys. Res. 1992. V. 97. № E1. P. 947–973.
33. Ahrens T.J., O'Keefe J.D. Equation of state and impact-induced shock wave attenuations on the Moon // In: Impact and explosion cratering. N. Y.: Pergamon Press. 1977. P. 639–656.
34. Cintala M.J., Grieve R.A.F. Scaling impact melting and crater dimensions: Implications for the lunar cratering record // Meteoritics & Planet. Sci. 1998. V. 33. P. 889–912.
35. Jarosewich E. Chemical analyses of meteorites: a complication of stony and iron meteorite analyses // Meteoritics. 1990. V. 25. P. 323–337.
36. 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.
37. Яковлев О.И., Косолапов А.И., Кузнецов А.В., Нусинов М.Д. Результаты исследования фракционного испарения базальтового расплава в вакууме // Докл. академии наук СССР. 1972. Т. 206. № 4. С. 970–973.
38. Hashimoto A. Evaporation metamorphism in the early solar nebula – evaporation experiments on the melt FeO–MgO–SiO₂–CaO–Al₂O₃ and chemical fractionations of primitive materials // Geochemical Journal. 1983. V. 17. P. 111–145.
39. Яковлев О.И., Маркова О.М., Семенов Г.А., Белов А.Н. Результаты экспериментов по испарению хондрита Крымка // Метеоритика. 1984. Вып. 43. С. 125–133.
40. Маркова О.М., Яковлев О.И., Семенов Г.А., Белов А.Н. Некоторые общие результаты экспериментов по испарению природных расплавов в камере Кнудсена // Геохимия. 1986. № 11. С. 1559–1569.
41. Hashimoto A., Kumazawa M., Onuma N. Evaporation metamorphism of primitive dust material in the early solar nebula // Earth and Planetary Science Letters. 1979. V. 43. № 1. P. 13–21.
42. Ожегов П.И., Глотов В.А., Мерзляков А.В., Сурков Ю.А. и др. Изменение валентного состояния железа в базальтах при испарении в вакууме // Геохимия. 1973. № 8. С. 1229–1232.
43. Stephens J.R., Kothari B.K. Laboratory analogues to cosmic dust // The Moon and the Planets. 1978. V. 19. P. 139–152.
44. Гейнце В. Введение в вакуумную технику. М.–Л.: Гос. энерг. изд., 1960. Т. 1. 511 с.
45. Carter J.L., McKay D.S. Metallic mounds produced by reduction of materials of simulated lunar composition and implication on the origin of metallic mounds on lunar glasses // Proceeding of the 3d Lunar Sci. Conf. 1972. V. 1. P. 953–970.
46. Pearce G.W., Willians R.J., McKay D.C. The magnetic properties and morphology of metallic iron produced by subsolidus reduction of synthetic Apollo 11 composition glasses // Earth Planet. Sci. Lett. 1972. V. 17. P. 95–104.
47. Moroz L.V., Fisenko A.V., Semjonova L.F. et al. Optical effects of regolith processes on S-asteroids as simulated by laser shots on ordinary chondrite and other mafic materials // Icarus. 1996. V. 122. P. 366–382.
48. Gerasimov M.V., Dikov Yu.P., Yakovlev O.I., Wlotzka F. Reduction of Iron During an Impact // In: Impact markers in the stratigraphic record (abstract). 2001. CSIC-UGR, Granada (Spain), p. 31–32.
49. King E.A. Reduction, partial evaporation, and spattering: possible chemical and physical processes in fluid drop chondrule formation // In: Chondrules and their origin. 1983 / Ed. E.A. King. LPI. Houston. P. 180–187.
50. Казенас Е.Л., Чижииков Д.М. Давление и состав пара над окислами химических элементов. М.: Наука, 1976. 342 с.
51. Куликов И.С. Термическая диссоциация соединений. М.: Металлургия, 1969. 574 с.
52. Arndt J., von Engelhardt W. Formation of Apollo 17 orange and black glass beads // Proc. 17th Lunar Planet. Sci. Conf.; J. Geophys. Res. Suppl. 1987. V. 92. P. E372–E376.
53. Delano J.W., Lindsley D.H. Glasses of impact origin from Apollo 11 and Apollo 12: evidence for volatile-loss and mare/highland mixing // Lunar. Planet. Sci. XII (Abstracts). 1981. P. 223–225.
54. Shearer C.K., Papike J.J., Galbreath K.C. et al. A SIMS study of lunar “komatiitic glasses”: trace element characteristics and possible origin // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1990. V. 54. P. 1851–1857.
55. Finkelman R.B. Analysis of the ultrafine fraction of the Apollo 14 regolith // Proc. Lunar Sci. Conf. 4th. 1973. P. 179–189.