

ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ HASP И GASP СТЕКОЛ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Яковлев О. И. (ГЕОХИ РАН, ИКИ РАН), **Диков Ю. П.** (ИГЕМ РАН, ИКИ РАН),
Герасимов М. В. (ИКИ РАН).

yakovlev@geokhi.ru , dikov@igem.ru , mgerasim@mx.iki.rssi.ru

Ключевые слова: *испарение, конденсация, реголит, Луна*

При высокоскоростном соударении и образовании ударных кратеров на лунной поверхности некоторая масса соударяющихся тел плавится и испаряется. В процессе разлета гетерогенного облака выбросов, представляющего смесь пара, фрагментов расплава и обломочного материала, происходит резкое охлаждение облака, что приводит к закалке расплава и частичной конденсации пара, как в объеме облака, так и на относительно холодной поверхности жидких и твердых частиц. Явные доказательства присутствия продуктов ударного испарения вещества были обнаружены в стеклах тонкой фракции (~0.4-10 мкм) лунного реголита. В статье [1] были представлены необычные составы стекол из реголита Apollo-16, характерные особенности которых заключались в высоких содержаниях алюминия и низких кремния. (Отсюда происходит название этих стекол – HASP (High-Alumina-Silica-Poor)). HASP стекла содержали от 30 до 34 мас.% SiO₂, от 32 до 36 мас.% Al₂O₃ и 20 мас.% CaO. В статье впервые была высказана гипотеза их происхождения в результате ударного плавления и селективного испарения расплавов глиноземистых пород Луны. В последующих работах многих авторов [2-7] подобные образования были обнаружены в реголитовом материале практически всех лунных экспедиций, а импактно-испарительная гипотеза образования HASP-стекол признана как единственно возможная.

К последней публикации, посвященной продуктам ударного испарения и конденсации на Луне, относится статья П. Воррена [7]. В ней приведены многочисленные данные о составах HASP-стекол и конденсатов, обнаруженных в образце реголитовой брекчии Apollo 14 № 14076. Конденсаты наблюдались в форме мелких (<10 мкм) сферул и кластов, и были названы автором GASP конденсатами (Gas-Associated Spheroidal Precipitate). GASP сферулы образовались при объемной конденсации в жидкие (расплавленные) капли, о чем свидетельствует их закалочная структура. Концентрация Al₂O₃ во всех GASP стеклах никогда не превышает 2.5 мас.% и в среднем составляет 0.4 мас.%. По химическим особенностям, а именно, по содержанию FeO и SiO₂, GASP конденсаты разделены на богатые железом FeGASP и богатые кремнеземом SiGASP конденсаты.

Опираясь на экспериментальные данные по испарению образца глиноземистого базальта № 68415,40 из сборов Apollo 16 [8], где были рассчитаны как составы остаточных расплавов, так и комплементарные составы пара при различных температурах и массопотерях, мы провели сравнение полученных составов с данными составов HASP-стекол и сферических GASP конденсатов, описанных в статье П. Воррена. Цель сравнения состояла в оценке испарительных массопотерь и температуры образования HASP-стекол и GASP конденсатов.

Испарение образца № 68415,40 исходного состава (масс.%): SiO₂ 45.5; TiO₂ 0.3; Al₂O₃ 28.7; FeO 4.3; MgO 4.4; CaO 16.4; Na₂O 0.4 K₂O < 0.1, было выполнено эффузионным методом Кнудсена в сочетании с масс-спектрометрическим анализом паровой фазы (масс-спектрометр МС-1301) [9]. Метод позволил определить равновесные параметры (температуру, парциальные давления компонентов) системы расплав-пар в широком диапазоне температур (до ~2600°C). В ходе эксперимента были рассчитаны составы остаточных расплавов и пара при различных температурах и испарительных массопотерях. Метод позволял измерять наименьшее давление в эффузионной камере на уровне 10⁻⁷ мм рт.ст.. Верхний предел давления составлял 10⁻¹-10⁻² мм.рт.ст. Камера Кнудсена нагревалась способом электронной бомбардировки. Температура измерялась оптическим пирометром в пирометрическом отверстии камеры, имитирующем условия излучения абсолютно черного тела. Точность определения температуры составляла ± 1°. Испарение осуществлялось в вольфрамовой эффузионной камере. Для уменьшения взаимодействия вольфрама с расплавом образец мас-

сой 15 мг помещался в расположенную на дне камеры Re-лодочку. Испарение в ренийевом контейнере резко уменьшало восстановительное действие вольфрама, хотя не исключало его полностью. Опыты проводились в режиме ступенчатого подъема температуры с шагом $\sim 50^\circ$. Продолжительность выдержки на температурной ступени определялась временем необходимым для регистрации всего масс-спектра образца и составляла ~ 15 мин. Такие условия ступенчатого нагревания позволяли сохранять при данной массе образца молекулярный режим истечения пара и оптимально сократить длительность опыта. Общее время опыта от $T \sim 900^\circ\text{C}$ до полного испарения образца составляло $\sim 5-7$ часов.

Измеренные парциальные давления компонентов позволили рассчитать скорости испарения компонентов по формуле Герца-Кнудсена. В свою очередь, скорости испарения позволили рассчитать составы остаточных расплавов и пара при различных температурах и испарительных массопотерях. Состав остаточного расплава определялся по измеренным скоростям компонентов на всех этапах (температура и время) испарения образца вплоть до его полного исчерпания. После пересчета масс компонентов на окисные формы и приведения соотношений масс к 100 мас.% получался валовый состав остаточного расплава на каждой температурной ступени. Состав комплементарного пара определялся путем вычитания масс отдельных компонентов в остаточном расплаве из массы данного компонента в исходном образце с последующим суммированием масс компонентов в паре и приведения к 100 мас.%.

Результаты эксперимента показали, что на самых начальных этапах испарения в паре преобладают щелочные компоненты (рис. 1). При низких массопотерях ($\sim 5\%$) содержания K_2O в паре достигает значений 3-5 мас.%, а Na_2O 10 мас.%. Эти значения содержания щелочей характерны для температур расплава $\sim 1700^\circ\text{C}$. Но уже при массопотерях расплава $>20\%$ и, соответственно, температурах $>1850^\circ\text{C}$ доля щелочей в паре составляет ~ 1 мас.% и меньше.

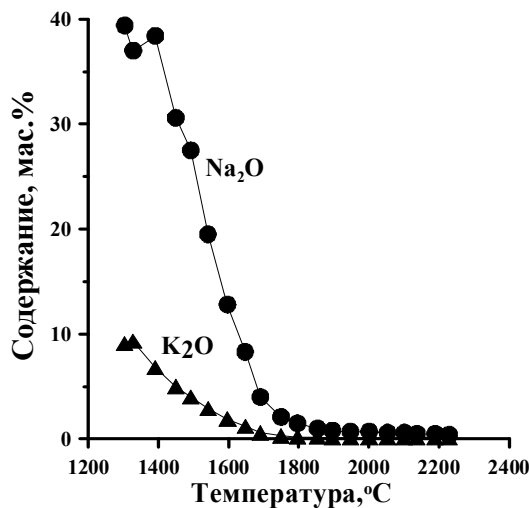


Рис.1. Содержание щелочей в паре в зависимости от температуры испарения глино-земистого базальта (образец № 68415; Apollo 16)

На рис. 2, 3 показаны содержания главных компонентов остаточного расплава в зависимости от температуры и испарительных массопотерь, а на рис. 4, 5 те же зависимости содержаний компонентов, но уже в комплементарном паре. Данные эксперимента наглядно демонстрируют, что в области высоких температур основными компонентами остаточного расплава являются SiO_2 , Al_2O_3 и CaO , а основными компонентами пара – FeO и SiO_2 . Содержания этих компонентов отражают температурные условия испарения, что дает основание для построения термометрических диаграмм $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ для остаточных расплавов и FeO-SiO_2 для конденсатов. В представленных данных следует обратить внимание на два обстоятельства. При испарительных массопотерях 60% и выше и температурах $>1850^\circ\text{C}$ в остаточном расплаве практически полностью исчезает кремнезем. Соответственно, рост содержания SiO_2 в паре происходит до $T=1855^\circ\text{C}$, а затем содержание падает из-за увеличения в паре содержаний Al_2O_3 и CaO .

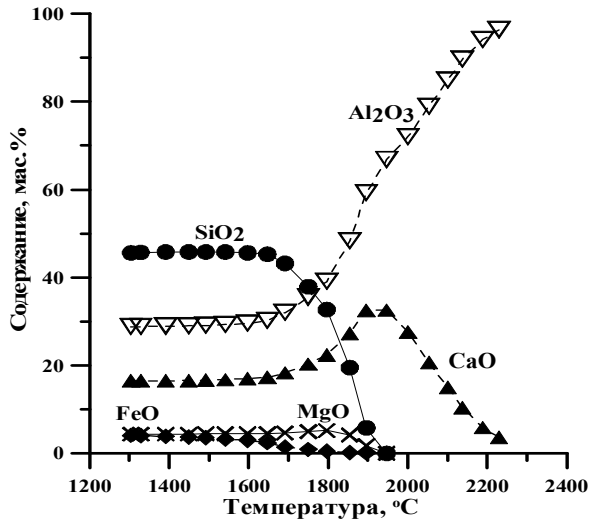


Рис.2. Состав остаточного расплава базальта Аполло-16 в зависимости от температуры

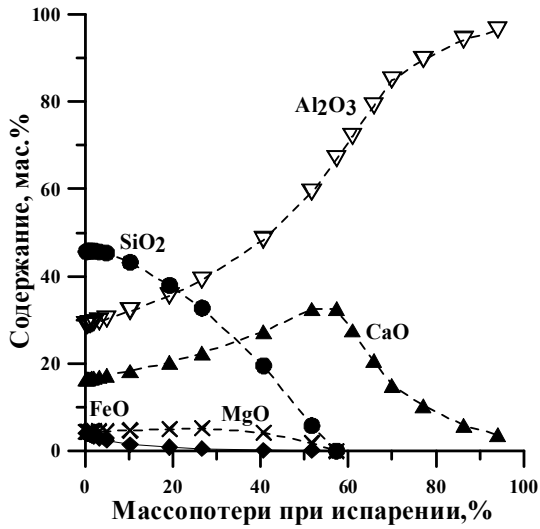


Рис.3. Состав остаточного расплава базальта Аполло-16 в зависимости от испарительных массопотерь

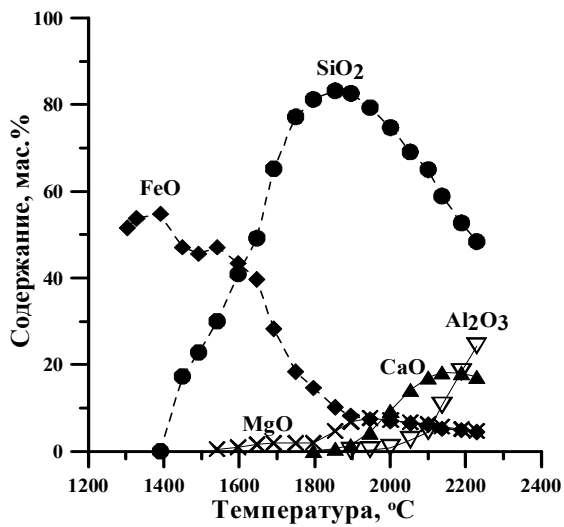


Рис.4. Состав комплементарного пара при испарении глиноземистого базальта Аполло 16 в зависимости от температуры

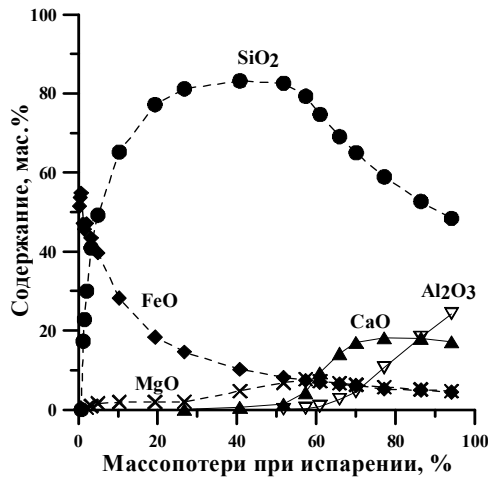


Рис.5. Содержание компонентов в паре в зависимости от массопотери при испарении глиноземистого базальта Apollo 16

Основные результаты эксперимента, т.е. составы остаточных расплавов и комплементарных паров, были сравнены с составами сферул HASP и GASP, описанных П. Ворреном в образце № 14076 реголитовой брекчии Apollo 14 (рис. 6, 7).

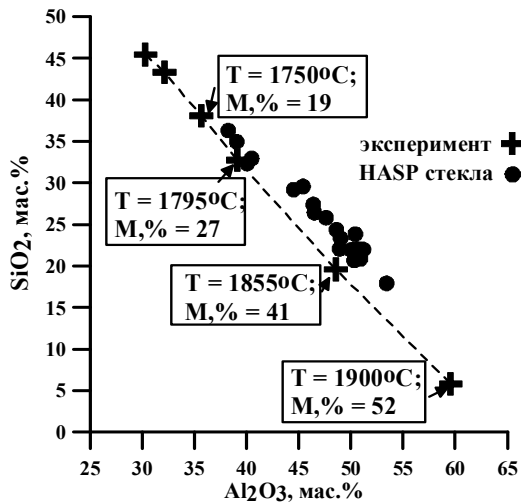


Рис.6. Сравнение составов стекол HASP [Warren, 2008] с составами остаточного расплава лунного базальта

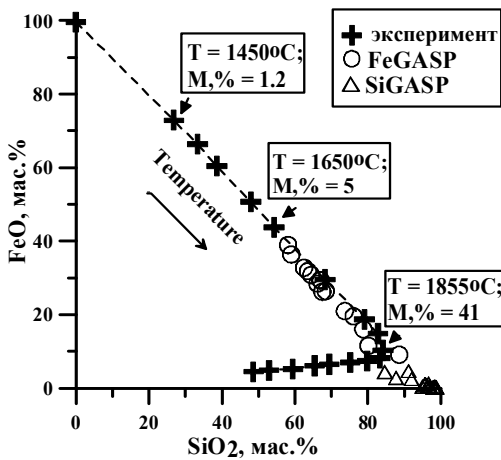


Рис.7. Сравнение составов стекол FeGASP и SiGASP с составами комплементарного пара над расплавом базальта

Предполагалось [7], что температуры образования HASP стекол были $> 1600^{\circ}\text{C}$, а потери при испарении составляли от четверти до трети от первоначальной массы ударного расплава. Результаты сравнения (рис. 6) в целом подтверждают эти предположения, но позволяют более детально

оценить температурные условия испарения. На рис. 6 для ряда экспериментальных точек приведены соответствующие данные по температуре и массопотерям. Из этих данных следует, что составы HASP хорошо согласуются с данными эксперимента. Они находятся на тренде испарения в интервале температур $\sim 1750-1870^{\circ}\text{C}$ и массопотеря $\sim 20-50\%$. Разброс составов HASP свидетельствует об индивидуальной термической истории каждой частицы. Процесс конденсации происходил из комплексного пара богатого FeO и SiO₂ на поздней стадии разлета, когда испарение расплава, вследствие охлаждения облака, прекратилось [7]. Как следует из рис. 7, конденсация FeGASP происходила при температурах $\sim 1860-1650^{\circ}\text{C}$. При этом более железистые сферулы достигали более низких температур конденсации. Положение составов SiGASP (рис. 7) находится за пределами экспериментальных составов пара, но, при этом, составы находятся на продолжении тренда возрастания содержания SiO₂ в паре (до $T=1855^{\circ}\text{C}$). Эти данные показывают, что SiGASP конденсировались из пара при более высокой температуре, чем сферулы FeGASP. Высокое содержание SiO₂ можно объяснить либо невозможностью конденсации FeO из-за высокой температуры поверхности SiGASP конденсатных капель, либо прекращением конденсации пара на стадии разлета облака, когда плотность пара упала ниже критической. Различие составов конденсатных сферул также отражает их индивидуальную историю конденсации в условиях быстрой смены физико-химических параметров в охлаждающемся ударно-образованном облаке.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 07-05-01054, 08-05-00786 и ОНЗ-5 Программы Отделения Наук о Земле РАН

Литература

1. Naney M.T., Crowl 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 // Lunar and planetary Institute, Houston. Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. 1976. V. 1. P. 155-184.
2. Vaniman D.T. Glass variants and multiple HASP trends in Apollo 14 regolith breccias // Lunar and planetary Institute, Houston. Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 20th. 1990. P. 209-217.
3. Keller L.P., McKay D.S. Micrometer-sized glass spheres in Apollo 16 soil 61181: Implication for impact volatilization and condensation // Lunar and Planetary Institute. Houston. Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.. 1992(a). V. 22. P. 137-141.
4. Keller L.P., McKay D.S. Impact glasses and vapor condensates in Apollo 11 soil 10084 // Lunar Planetary Sci. Conf. XXIII. (Abstract). 1992(b). P. 673-674.
5. Norris J.A., Keller L.P., McKay D.S. Impact glasses from the ultrafine fraction of lunar soil // Lunar Planetary Sci. Conf. XXIV. (Abstract). 1993. P. 1093-1094.
6. Adcock C.T., Spilde M.N., Papike J.J. Automated HASP glass search using electron microprobe // Lunar Planetary Sci. Conf. XXVIII. (Abstract). 1997. P. 5-6. CD-ROM. # 1151.
7. Warren P.H. Lunar rock-rain: Diverse silicate impact-vapor condensates in an Apollo-14 regolith breccias // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008. V. 72. P. 3562-3585.
8. 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.
9. Семенов Г.А., Николаев Е.Н., Францева К.Е. Применение масс-спектрометрии в неорганической химии // Ленинград. Химия. 1976. 152с.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/1-2009/informbul-1_2009/planet-36.pdf

Опубликовано 1 сентября 2009 г.

© *Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009*

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала,

ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна