

*К.П.ФЛОРЕНСКИЙ, А.В.ИВАНОВ, М.А.НАЗАРОВ, О.Д.РОДЭ,  
О.И.ЯКОВЛЕВ*

## **СЕЛЕКТИВНОЕ ИСПАРЕНИЕ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ЛУННЫХ ОБРАЗЦОВ**

*K.P.Florensky, A.V.Ivanov, M.A.Nazarov, O.D.Rode, O.I.Yakovlev (USSR)*

### SELECTIVE VAPORIZATION AS A FACTOR OF THE FORMATION OF THE LUNAR SAMPLE COMPOSITION

The processes of melting and vaporization of lunar rocks by meteoroid bombardment may lead to essential alteration of the physical characteristics and the chemical composition of the lunar surface formations. The investigation of the lunar regolith samples indicates that the fractionation of the components in order of their volatilities and noticeable loss of more volatile elements (alkalies, iron and silicon) occur in these processes. At the early stage of lunar history the processes of selective vaporization may be very important for formation of chemical composition of the lunar crust.

Метеоритная бомбардировка Луны приводит к глубокой переработке поверхностных пород вплоть до плавления и частичного испарения вещества. Процессы эти, связанные с воздействием высокой температуры в условиях глубокого вакуума, могут приводить к заметным изменениям физических характеристик и химического состава лунных поверхностных образований. Эти изменения должны учитываться при интерпретации результатов исследований лунных образцов.

Эксперименты по плавлению полевых шпатов и закалке стекол в вакууме показали, что при этом происходит возрастание плотности и показателя преломления стекол по сравнению с образцами, сплавленными при атмосферном давлении. Так, стекла плагиоклаза  $An_{18}$  и калиевого полевого шпата, сплавленные в вакууме  $10^{-6}$  торр при температуре 1300 и 1450° С соответственно, имели плотность  $\rho_{пл} = 2,42$

и  $\rho_{\text{кпш}} = 2,36 \text{ г/см}^3$ , тогда как полученные при давлении 1 атм стекла имели соответственно  $\rho_{\text{пл}} = 2,31$  и  $\rho_{\text{кпш}} = 2,29 \text{ г/см}^3$ . Показатель преломления полученных в вакууме стекол был выше на 0,006–0,007. Отклонения рассматриваемых параметров от «нормальных» значений, по-видимому, не связаны с изменением структуры стекла, поскольку ИК-спектры стекол полевых шпатов, полученных при различных значениях  $p$  и  $T$ , во всех случаях были практически идентичны. Как показали результаты химических анализов, эти отклонения не связаны также и с изменением химического состава стекол. Можно полагать, что аномальность физических свойств стекол, полученных в вакууме, обуславливается уменьшением удельного объема стекла из-за выделения из расплава растворенных газов. Стекла лунного реголита, по-видимому, должны обладать такими же аномальными характеристиками, что подтверждается, например, обнаружением В.Энгельгардтом и др. (1970) в образцах «Аполлона-11» плагиоклазовых стекол, показатель преломления и плотность которых были выше нормальных для земных образцов такого же состава на 0,010 ед. и 0,20  $\text{г/см}^3$  соответственно.

Плавление и испарение расплавов в вакууме могут вызывать значительное изменение их состава. Как показывают экспериментальные исследования, интенсивность испарения компонентов из расплавов во многом определяется общим составом расплава. Для расплавов основных пород, к которым принадлежат породы лунной поверхности, к наиболее летучим элементам относятся щелочи, к умеренно летучим — железо и кремний (Яковлев и др., 1972).

Уже при первых исследованиях доставленных на Землю образцов лунного реголита исследователями отмечался дефицит щелочных металлов и некоторых других компонентов, в том числе и кремнезема, в реголите в целом и особенно в наиболее переработанных его фракциях — стеклах, агглютинатах и т. п. — по сравнению с

первичными кристаллическими породами, причем этот дефицит связывался с процессами фракционирования вещества при испарении в результате метеоритной бомбардировки (Fredriksson e. a., 1970). Нами эффект селективного испарения лунного вещества был зафиксирован при исследовании хондроподобных образований лунного реголита (Иванов и др., 1975).

Некоторые из исследованных образцов хондров (рис. 1) характеризуются аномальным химическим составом: столь низким содержанием кремнезема, что составы этих частиц не поддаются обычному нормативному пересчету на реальные, в принципе присутствующие в лунных образцах минералогические компоненты. Силикатные стекла с такой же аномалией химического состава были встречены нами среди анализов частиц из различных сборов, изученных другими исследователями. Эту аномалию крайне трудно объяснить какими-либо вариантами кристаллизационной дифференциации, но она хорошо согласуется с представлениями о селективном испарении вещества.

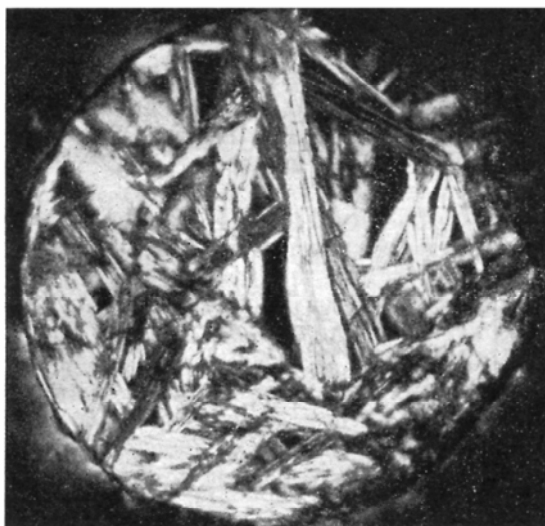


Рис. 1. Хондровид со сфероподобной структурой диаметром около 750 мкм из образца «Луны-20». Николи скрещены.

Состав его в целом и особенно состав интерстициального стекла (изотропные участки трапециевидной формы) характеризуются аномально низким содержанием  $\text{SiO}_2$  (дефицит соответственно 8.3 и 20.2%). Тонкая (около 20 мкм) периферическая зона заметно обогащена кремнеземом, железом и щелочами по сравнению с хондровидом в целом.

Невозможность обычного нормативного пересчета вследствие недостатка кремнезема является наиболее четким, но не единственным показателем заметной потери этими частицами компонентов при испарении. Они характеризуются также по сравнению с частицами подобного же типа, но не подвергшимися испарению (в тех случаях, когда такое сравнение возможно), более низким содержанием щелочей и в меньшей степени железа и более высоким содержанием алюминия, кальция и титана.

Сопоставление составов хондритов в целом и их краевых зон указывает на заметное возрастание в ряде случаев в краевых зонах содержания щелочей, железа и кремнезема, т. е. как раз тех компонентов, для которых отмечено значительное испарение. Этот эффект может быть объяснен процессом, противоположным испарению, — конденсацией элементов из образовавшегося при взрыве парового облака на поверхности частиц. Обогащение поверхности силикатных шариков щелочами и фосфором в результате процесса конденсации отмечалось ранее Г.Куратом и К.Кайлом (Kurat, Keil, 1972).

Из двух противоположно направленных процессов, связанных с метеоритной бомбардировкой лунной поверхности — испарения и конденсации, — первый явно преобладает. Р.Клейтон с соавторами (Clayton e. a., 1974) суммировали данные по изотопному составу ряда элементов в разных типах лунных пород и показали, что потери кремния и кислорода в результате процессов фракционного испарения при образовании реголита составляют около 1%, а потери серы и калия достигают по крайней мере 20–30%. Нами оценки потерь элементов при испарении были сделаны на основании анализа опубликованных данных (Иванов, 1975, 1977; Ivanov, Florensky, 1975).

Для оценки потерь натрия мы сравнили в графической форме (рис. 2) содержания труднолетучего ( $Al_2O_3$ ) и легколетучего ( $Na_2O$ )

компонентов, нормированные по содержанию другого труднолетучего ( $\text{TiO}_2$ ), в кристаллических породах и стеклах базальтового состава из образцов морского реголита «Аполлона-11» и «Луны-16» (Prinz e. a., 1971; Green e. a., 1972). Первое отношение достаточно четко определяет место образца в общем ряду морских базальтов, второе — относительное содержание легколетучего компонента в данном образце в предположении, что титан и алюминий не теряются при

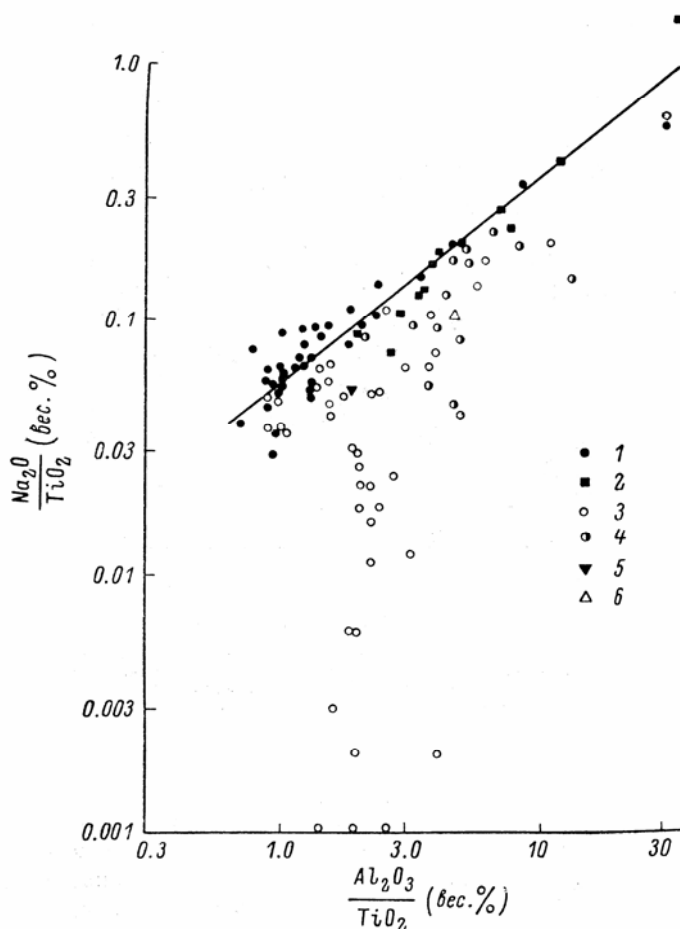


Рис. 2. Зависимость значений отношений  $\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  в образцах из морского реголита.

1 — кристаллические породы «Аполлона-11»; 2 — кристаллические породы «Луны-16»; 3 — стекла «Аполлона-11»; 4 — стекла «Луны-16»; 5 — мелкая фракция реголита «Аполлона-11»; 6 — мелкая фракция реголита «Луны-16».

реголитообразовании.

Как видно из графика, фигуративные точки базальтовых пород образуют четкую полосу, тогда как точки, отражающие состав стекол, лежат ниже, т. е. стекла характеризуются меньшим содержанием натрия. Закономерный характер распределения составов в выбранных

координатах позволяет дать количественную оценку потери натрия из отдельных частиц. Примерно 15% частиц стекол из обоих сборов потеряло не более 25% первоначального количества натрия, 31% частиц — от 25 до 50, 20% частиц — от 50 до 75, 17% частиц — от 75 до 90 и 17% частиц — более 90% натрия. В среднем потери натрия для 14 частиц стекла «Луны-16» составляют 55%, для 41 частицы стекла «Аполлона-11» — 75%. Полученные аналогичным образом оценки потерь натрия из тонкой фракции реголита «Луны-16» и «Аполлона-11» составляют соответственно 47 и 41%.

Количественная оценка потери кремнезема проводилась путем расчета нормативного состава частиц по их химическому составу с введением дополнительного  $\text{SiO}_2$  в количестве, необходимом для связывания компонентов в реально присутствующие в лунных породах минеральные фазы — полевые шпаты, оливины и пироксены, причем количество пироксенов определялось количеством кальция, оставшегося после образования плагиоклазов и связанного в волластонит, и соотношением  $Wo = En + Fs$ . Несомненно, полученные таким способом оценки являются заниженными, поскольку, как правило, в пироксенах лунных магматических пород  $Wo < En + Fs$  и, кроме того, при расчетах не учитывается испарение других компонентов, в первую очередь щелочей и железа, также присутствующих в виде силикатных минералов. Однако и эти заниженные оценки показывают весьма высокую интенсивность процесса потери кремнезема при лунных экзогенных процессах: в ряде случаев количество испарившейся кремнекислоты превышает 30% от ее первоначального содержания.

Можно полагать, что процесс селективного испарения вещества весьма широко распространен на лунной поверхности. Относительная редкость частиц стекол, несущих наиболее четкий критерий испарения — невозможность обычного нормативного пересчета в связи с дефицитом кремнезема, — объясняется, очевидно, маскирующим

действием одновременного испарения других компонентов, и прежде всего щелочей и железа, а также изменением типа ферромагнезиальных силикатов — переходом их в менее насыщенные кремнеземом формы (т. е. замена пироксенов оливином). Эти маскирующие факторы должны проявляться особенно сильно в случае испарения морских базальтовых пород.

В нормативном минералогическом составе стекол рассмотренный процесс селективного испарения должен приводить к следующим закономерным изменениям: 1) переходу от стекол, соответствующих по составу пироксеновым породам, к стеклам пород, содержащих оливин и шпинель, т. е. к смене габбро-норитового состава троктолитовым и шпинель-троктолитовым составами; 2) уменьшению железистости ферромагнезиальных минералов; 3) уменьшению содержания щелочных полевых шпатов и увеличению основности плагиоклаза; 4) увеличению содержания ильменита.

Хорошим примером таких закономерных изменений являются данные по составу стекол «Аполлона-14», взятые нами из работы Э. Чао и др. (Chao e. a., 1972). Большая часть частиц одной из групп стекол, выделенных этими авторами, — стекло состава шпинелевых троктолитов — несет признаки испарения кремнезема: состав их либо вообще не поддается нормативному пересчету из-за дефицита  $\text{SiO}_2$ , либо имеет  $\text{Wo} > \text{En} + \text{Fs}$ . Наиболее вероятным кандидатом «родоначальных пород» для троктолитовых стекол является материал реголита, представленный стеклами базальтового состава. Это предположение подтверждается и характером распределения точек на диаграмме (рис. 3): поля составов в общем продолжают друг друга. Статистика здесь, конечно, мала, но тенденция представляется достаточно ясной. Образование стекол троктолитового состава в результате фракционного испарения материала базальтового состава подтверждается сравнением отмеченных ранее параметров этих групп стекол (см. таблицу):

троктолитовые стекла по сравнению с базальтовыми характеризуются уменьшением железистости и щелочности, увеличением содержания ильменита и т. д.

Таблица

**Некоторые характерные параметры состава стекол,  
пересчитано нами по данным Э.Чао и др. (Chao e. a., 1972)**

Состав стекло	$\frac{Ol}{Ol + Px}$ (мол.)	$\frac{Fe + Mn}{Fe + Mn + Mg}$ (мол.)	$\frac{Or + Ab}{Or + Ab + An}$ (мол.)	Номер плаггиоклаза	Содержание ильменита, мол. %
Базаль- товый	$\frac{0-0,30}{0,05}$	$\frac{0,27-0,59}{0,40}$	$\frac{0,0007-0,31}{0,14}$	$\frac{77,4-100}{89,8}$	$\frac{2,36-5,14}{4,04}$
Тракто- литовый	$\frac{0,54-1,00}{0,80}$	$\frac{0,30-0,36}{0,32}$	$\frac{0-0,022}{0,008}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{4,99-5,84}{5,57}$

Примеры таких испаренных составов встречены нами для образцов из всех сборов как среди стекол, так и среди кристаллических фрагментов. Присутствие кристаллических фрагментов аномального состава согласуется с достаточно распространенной точкой зрения об образовании их в результате раскристаллизации поверхностных ударных расплавов.

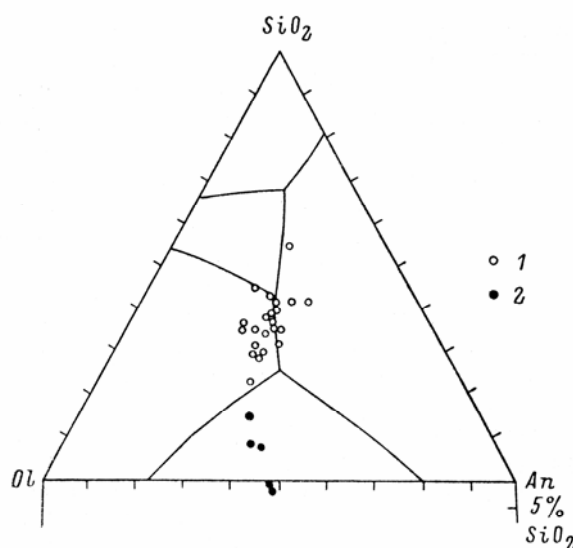


Рис. 3. Фигуративные точки стекол базальтового (1) и троктолитового (2) состава в системе  $SiO_2-Ol-An$  при  $Fe/(Fe + Mg) \approx 0.3$ .



Таким образом, процесс селективного испарения элементов при образовании реголита имеет достаточно широкое развитие и накладывает серьезные петрохимические ограничения на интерпретацию происхождения слагающих его частиц. Можно отметить, что эта точка зрения сейчас завоевывает новых сторонников (см. например, Naney e. a., 1976).

В то же время следует подчеркнуть более крупное значение процесса селективного испарения, связанного с метеоритной бомбардировкой поверхности Луны и других планетных тел. Действительно, на конечной стадии аккреции этап слипания отдельных частиц пылевого облака по мере роста массы центрального тела сменяется мощной метеоритной бомбардировкой, под влиянием которой складывается формирование верхних оболочек планет.

При этом в ударных взрывах происходят частичная дегазация, плавление и испарение падающих тел. Если планетное тело растет достаточно быстро или его масса уже велика, выделившиеся продукты взрыва не в состоянии диссипировать и скапливаются в наружной оболочке планеты. Атмосфера (и гидросфера) растет вместе с ростом планеты, как это происходило с Землей. Если же центральное тело не в состоянии полностью удержать продукты взрыва, то оно может прекратить свой рост или даже потерять исходную массу, как это происходит, например, со спутниками Марса и астероидами в настоящее время. При этом прекращение роста тела или близкое к этому состояние вызывают дифференциацию вещества на поверхности, сопровождаемую потерей даже относительно малолетучих компонентов (K, Na, Fe, Si), которые не успевают осесть в виде конденсата, что в малой степени проявляется при формировании реголита и в чем мы видим свидетельства отрицательного баланса вещества Луны и накопления труднолетучих.

Поскольку при этом происходила многократная ударная переработка большой массы вещества, даже небольшой коэффициент разделения при селективном испарении должен приводить к существенным результатам. Таким образом, уже в процессе первоначального формирования планеты возникает ее дифференциация на оболочки различного состава вследствие множественности горячих при ударе точек, образующих своеобразную зону, от которой идет дифференциация вещества от периферии к центру.

Рассматривая Землю и Луну, мы видим, как один и тот же процесс в зависимости от характера своего развития привел к накоплению легколетучих элементов в земной коре и, наоборот, к накоплению труднолетучих компонентов в реголите Луны.

Многие современные гипотезы связывают наблюдающийся для Луны (точнее говоря, для пород верхней оболочки Луны) дефицит легколетучих компонентов с образованием Луны из тел, уже обедненных этими компонентами.

Мы полагаем, что процесс фракционного испарения также играл важную роль при формировании химизма верхних оболочек Луны, и его влияние должно учитываться при реконструкциях ранней истории планет.

Пока неясно, в какой степени подобные процессы могут быть ответственны за полноту наблюдаемых эффектов, но представляется несомненным, что они должны были наложить свой отпечаток на состав коры планет земного типа, в том числе и на образование первичной анортозитовой коры Луны.

#### *Список литературы*

*Иванов А.В.* Роль испарения в формировании химического состава лунных стекол. — *Геохимия*, 1975, №8.

- Иванов А.В., Флоренский К.П., Назаров М.А., Шевалеевский И.Д.* Некоторые проявления процессов испарения и конденсации при образовании частиц лунного реголита. — ДАН СССР, 1975, т. 221, №2.
- Иванов А.В.* Потери натрия при образовании морского реголита. — Геохимия, 1977, №6.
- Энгельгардт В., Аридт Дж., Мюллер В., Штеффлер Д.Ш.* Ударный метаморфизм в образцах лунных пород. — Изв. АН СССР, сер. геол., 1970, №6.
- Яковлев О.И., Косолапов А.И., Кузнецов А.В., Нусинов М.Д.* Результаты исследования фракционного испарения базальтового расплава в вакууме. — ДАН СССР, 1972, т. 206, №4.
- Chao E.C.T., Best J.B., Minkin J.A.* Apollo 14 glasses of impact origin and their parent rock types. — Proc. 3rd Lunar Sci. Conf., 1972, v. 1.
- Clayton R.N., Mayeda T.K., Hurd J.M.* Loss of oxygen, silicon, sulfur, and potassium from the lunar regolith. — Proc. 5th Lunar Sci. Conf., 1974, v. 2.
- Fredriksson K., Nelen J., Melson W.G.* Petrography and origin of lunar breccias and glasses. — Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., 1970, v. 1.
- Green J.A., Kurat G., Keil K., Prinz M.* Electron microprobe analyses of lithic fragments, glasses, chondrules and minerals from Luna 16 fines. — Spec. Publ. N 5, Univ. New Mexico, Inst. of Meteoritics, 1972.
- Ivanov A.V., Florensky K.P.* The role of vaporization processes in lunar rock formation. — Proc. 6th Lunar Sci. Conf., 1975, v. 2.
- Kurat G., Keil K.* Effects of vaporization and condensation on Apollo 11 glass spherules: implications for cooling rates. — Earth Planet. Sci. Lett., 1972, v. 14, N 1.
- Naney M.T., Growl 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. 7th Lunar Sci. Conf., 1976, v. 1.
- Prinz M., Bunch T.E., Keil K.* Electron microprobe analyses of lithic fragments and glasses from Apollo 11 lunar samples. — Spec. Publ. N 2, Univ. New Mexico, Inst. of Meteoritics, 1971.