

ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ЛУННЫХ ПОРОД (ПО ДАННЫМ μ РФА-СИ)

Тарасов Л.С.¹, Кудряшова А.Ф.¹, Ульянов А.А.², Барышев В.Б.³, Золотарев К.В.³

¹ - ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН, 117975 Москва

² - МГУ им. М.В. Ломоносова, 117899 ГСП Москва

³ - ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск.

Изучение частиц лунного реголита, доставленного на Землю всеми успешно завершившимися экспедициями «Аполлонов» и автоматическими станциями серии «Луна» методом микрорентгенофлуоресцентного анализа (μ РФА) с использованием синхротронного излучения (СИ) на накопительных кольцах ВЭПП-3 и ВЭПП-4, позволило получить данные по распределению редких элементов (Rb, Sr, Y, Nb, Ba, Ce и La) в различных типах морских и материковых лунных пород. Изучение характера фракционирования этих элементов уточнило и дополнило общепринятую классификационную схему лунных горных пород по перохимическим типам, а также позволило выделить новый тип (VLT-LT) лунных морских базальтов в грунте, доставленном станциями Луна-16, Луна-20 и, возможно, Луна-24.

Анализ разнообразных би-элементных диаграмм показывает, что петрохимически однотипные породы различных станций могут образовывать компактные или протяженные области. Поскольку в процессе эволюции магматического очага обычно происходит последовательная кристаллизация оливина, пироксена и плагиоклаза, то, очевидно, что часть редких (некогерентных или несовместимых) элементов, которые исходя из кристаллохимических критериев не могут входить в виде изоморфных примесей в породообразующие минералы, будут накапливаться в остаточном расплаве. Поэтому, уже в первом приближении степень обогащения той или иной породы некогерентными элементами будет являться количественным критерием степени дифференциации магматического расплава. На би-элементных диаграммах четко видны породы петрохимически принадлежащие одной группе, но с различной степенью геохимической дифференциации родоначальных магм. Максимальная степень дифференциации, как это следует из наших данных, установлена для VHA-NA базальтов Аполлонов 12, 14 и 15.

Наблюдаемый характер фракционирования химических элементов в лунном реголите является следствием протекания ряда различных планетарных процессов, имевших место на разных этапах эволюции Луны, как планеты. Например, для большинства проанализированных фрагментов установлено, что фракционирование химических элементов контролировалось их летучестью: на фоне относительно слабофракционированных между собой сверхтугоплавких (Zr, Y), умеренно тугоплавких (La, Ce) и умеренно летучих (Ba, Nb) элементов наблюдается существенное обеднение еще более умеренно летучими (Sr) и летучими (Rb) элементами. Вероятно процесс, ответственный за обеднение лунных пород летучими и умеренно летучими элементами, был связан с аккрецией Луны, протекавшей в «горячем» состоянии и, таким образом, полученные нами данные, противоречат модели «холодной аккреции» Луны, предложенной в работах некоторых предыдущих исследователей. Тем не менее ряд лунных фрагментов обнаруживает четкую положительную аномалию Sr, не объяснимую с позиции модели «горячей» аккреции. Эта аномалия Sr является результатом присутствия повышенного количества полевошпатового компонента в составе анализируемых частиц.

Таким образом, на характер фракционирования элементов в лунном реголите наложил свой отпечаток не только процесс селективного испарения вещества во время «горячей» аккреции, но и последующие процессы магматической дифференциации, а также кристаллохимическая схожесть ионов некоторых редких элементов и главных катионов в составе породообразующих минералов. Расположив элементы в порядке уменьшения их степени некогерентности (Rb, Ba, La, Ce, Sr, Zr, Y) и используя при этом СИ-нормированные концентрации, спектры фракционирования элементов можно сопоставить с таковыми для остаточных расплавов, образовавшихся при фракционной кристаллизации в различных моделях лунного магматического океана (LMO). Подобное сопоставление обнаруживает явное «портретное сходство» спектров фракционирования элементов в большинстве лунных частиц, измеренных нами, и рассчитанных для LMO. Однако при детальном сопоставлении спектров

фракционирования редких элементов в лунном реголите и в модельных представлениях обращает на себя внимание существенное различие в поведении рубидия. Вероятно, потеря летучего рубидия при аккреции Луны была существенно выше, чем это предусматривают модели ЛМО.

Еще более наглядную картину фракционирования редких элементов при дифференциации магматических расплавов можно получить, используя при нормировании состав лунной мантии. Подобный анализ полученных нами РФА-СИ данных указывает, что большая часть высокоалюминистых лунных базальтовых пород (обогащенных редкими элементами) генетически связана с дифференциацией морских базальтовых магм, а не с лунным магматическим океаном, как считалось ранее. Этот вывод, как и вывод о возможном протекании ряда планетарных процессов, сказавшихся на характере фракционирования элементов в лунных породах, являются основными достижениями в изучении лунных частиц методом РФА-СИ.

Исследования были финансово поддержаны программой «Университеты России - Фундаментальные исследования», проект 5305, и РФФИ, грант 99-05-64831.

Александр Анатольевич Ульянов ulyanov@geol.msu.ru

GEOCHEMISTRY OF RARE ELEMENTS IN DIFFERENT TYPES OF LUNAR ROCKS (BASED ON μ XFA-SR DATA)

L.S. Tarasov^a, A.F. Kudryashova^a, A.A. Ulyanov^b, V.B. Baryshev^c, and K.V. Zolotarev^c

^a Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, 117975 Moscow, Russia;

^b Lomonosov Moscow State University, 117899 GSP Moscow, Russia

^c Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of RAS, 630090 Novosibirsk, Russia

Micro (μ) X-ray fluorescence (XRF) analysis using synchrotron radiation (SR) on the storage rings VEPP-3 and VEPP-4 has been applied for determination of rare element (Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, and Ce) distributions in large collection of different lunar mare and highland rocks returned to the Earth by all successful missions of «Apollo» and «Luna». Investigations of fractionation trends of these rare elements define more precisely and supplement of the generally accepted classification scheme of lunar rocks. Moreover, it was discovered a new petrochemical type (VLT-LT) lunar mare basalts in Luna-16, Luna-20, and, possible, in Luna-24 regoliths.

Most of bi-elemental diagrams show that petrochemical similar rocks from different regions of the Moon formed the compact or stretch fields. Because the successive crystallization of olivine, pyroxene, and plagioclase usually take place in magmatic evolution process, then some part of rare (non-coherent) elements (these elements can not isomorphically introduce in crystal structure of rock-forming minerals) should be enriched in residual melts. Therefore, as a first approximation, assume that the increase of degree of rocks by non-coherent elements should be a quantity criteria of degree of magmatic differentiation of silicate melts. Bi-elemental diagrams clearly show the rocks of similar petrochemical types, but with different degree of geochemical differentiation of parent magmas. The more differentiated lunar rocks are VHA-HA basalts from regolith of Apollo 12, 14, and 15.

The fractionation of chemical elements in lunar regolith is the result of several different planetary processes which took place on different planetary evolution stages of the Moon as a planet. For example, most investigated lunar fragments show that fractionation process(es) was controlled by volatilities of elements: at relative low fractionation degrees of super refractory (Zr, Y), moderate refractory (La, Ce), and moderate volatile (Ba, Nb) elements, there are decreasing of contents of other moderate volatile (Sr) and volatile (Rb) elements. It is possible that process, which controlled of low contents of moderate volatile and volatile elements in modern lunar rocks, was related with «hot» Moon accretion. Our analytical data contradict to model of «cold» Moon accretion, which was suggested in literature early. However, some lunar fragments show clear positive anomaly of Sr, that can not be explained by model of «hot» accretion. These Sr-anomaly is a result of high contents of feldspar component in some lunar fragments.

Thus the patterns of element fractionation in lunar regolith be conditioned by not only selective evaporation events during «hot» accretion of the Moon, but also the following processes of magmatic differentiation, and crystallochemical similarity of ions of some rare elements with major cations in structure of rock-forming minerals. Diagrams of CI-normalized concentration of rare elements in lunar fragments vs. degree of non-coherency of rare elements show similarity with fractionation trends calculated for crystallization events in different models of lunar magmatic ocean (LMO). However the detail analysis of analytical and theoretical data shows the difference in fractionation of Rb. It is possible that loss of volatile Rb at «hot» Moon accretion was more essential process, than it was postulated in LMO models.

The more clear fractionation trends of rare elements at differentiation of magmatic melts may be obtained by using lunar mantle composition as normalized value. Consideration of all analytical data, obtained by μ XFA-SR methods shows that the most of HA and VHA basalts are results of partial melting of various basaltic magmas, but have not origin from magmatic ocean. This conclusion as are the conclusion about possibility of proceed of some planetary processes, resulting on fractionation trends of rare elements in different lunar rocks, are the most impotent results obtained by our μ XFA-SR studies of small lunar fragments in large collection of lunar regolith particles.

This research was supported by Program «Universities of Russia - Fundamental Investigations» grant 5305 and RFBR grant 99-05-64831.

Alexander Ulyanov ulyanov@geol.msu.ru

6-64

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ

Ю.П.Миронов¹⁾, С.Н.Кульков¹⁾, Б.П.Толочко²⁾, А.В.Бессергенов²⁾

¹⁾ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

²⁾ *Институт химии твёрдого тела и минералов СО РАН, Новосибирск*

Методом рентгенодифракционного кино на канале станции накопителя ВЭПП-3 Сибирского центра СИ исследовались пространственно-временные неоднородности пластической деформации поликристаллической меди в процессе растяжения. Получены количественные характеристики локализации деформации – компоненты тензора дисторсии ϵ_{xx} . Оказалось, что их средние значения хорошо согласуются с измеренными методом спекл-интерферометрии для аналогичного материала, однако их максимальные значения выше аналогичных величин, рассчитанных из спекл-интерферометрии на порядок.

При близком к 50 мкм среднем размере зерна (d), образцы имели различную толщину ($h=0.05-1$ мм). Применена геометрия съёмки близкая к скользящей, благодаря чему угловое перемещение рентгеновских пиков определялось преимущественно макроскопическим смещением отражающих зёрен в направлении движущегося захвата.

Показано, что в области относительной деформации до 3% наблюдаются сильные колебания интенсивности рентгеновских рефлексов - от нескольких десятков раз для образцов с $h/d \gg 1$ до нескольких тысяч раз для $h/d \sim 1$. Металлография показала, что в этой области деформаций происходит появление и, затем, размножение линий скольжения преимущественно одной системы. Деформация более 2-3% приводит к возникновению полос скольжения нескольких систем и далее к интенсивному развитию рельефа на поверхности. Колебания интенсивности рефлексов на этой стадии существенно уменьшаются.

Немонотонность изменения интенсивности рефлексов связана с переориентацией отражающих кристаллитов и их естественной сменой в процессе растяжения образца. Переориентация может возникать либо за счёт кристаллографического поворота при наличии преимущественной системы скольжения, либо наличия ненулевого компонента поворотной моды $\omega_2(x,t)$ тензора пластической дисторсии. Механизм, дающий немонотонность рентгеновских характеристик, не зависит от вида кривой σ - ϵ и одинаков для всех отношений h/d .