

На правах рукописи

Демидова Светлана Ивановна

**ЛУННЫЕ МЕТЕОРИТЫ И
ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ЛУННОЙ КОРЫ**

**Специальность 25.00.09 – геохимия,
геохимические методы поисков полезных ископаемых**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Москва 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии Наук Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институте геохимии и аналитической химии им В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН)

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук
М.А. Назаров (ГЕОХИ РАН)

Официальные оппоненты:
доктор геолого-минералогических наук В.И.Фельдман (МГУ)
кандидат геолого-минералогических наук О.И. Яковлев (ГЕОХИ РАН)

Ведущая организация: Учреждение Российской Академии Наук
Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН)

Защита состоится « » февраля 2011 г. в « » на заседании диссертационного совета Д 002.109.02 при Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН) по адресу: 119991, Москва В-334, ул. Косыгина 19, факс (495) 938-20-54

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГЕОХИ РАН

Автореферат разослан « » января 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. геол.-мин. наук

А.П. Жидикова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Луна – ближайшее к Земле небесное тело, представляющее непосредственный интерес для практического освоения и изучения процессов аккреции, дифференциации и эволюции планетных тел (Галимов, 2004). Почти полное отсутствие на Луне геологической активности в последние 3 млрд. лет позволяет полагать, что ее исследование имеет принципиальное значение для познания ранних этапов геологической истории Земли, следы которых были полностью уничтожены последующими эндогенными и экзогенными процессами.

В настоящее время наши знания о коровом веществе Луны базируются на данных дистанционного зондирования, результатах исследования лунных образцов, доставленных экспедициями «Аполлон» и АЛС «Луна», и метеоритах лунного происхождения. Дистанционные данные покрывают практически всю поверхность Луны, но отличаются низкой точностью и дают информацию о распределении очень ограниченного количества химических элементов. Лунные образцы изучены всем комплексом имеющихся лабораторных методов и представляют основную фактическую базу современного знания о Луне. Однако эти образцы доставлены только с видимой стороны Луны и из районов, которые были приемлемы для посадки космических аппаратов. Лунные метеориты представляют собой новый тип лунных образцов, доступных для лабораторного изучения. Случайный характер выброса этих метеоритов предполагает, что они представительно отражают состав поверхностного вещества как видимой, так и обратной стороны Луны. Настоящая работа посвящена исследованию минерального и химического состава лунных метеоритов Омана, типовые образцы которых хранятся в Метеоритной коллекции РАН, и выполнена в 2000-2009 годах в лаборатории метеоритики Института геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН.

Цель настоящей работы – определение вещественных характеристик лунной коры, основываясь на петрографическом, минеральном и химическом составе лунных метеоритов.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

- исследование вещественного состава лунных метеоритов, найденных в провинции Дофар (Оман);
- оценка среднего состава лунной коры на основе полученных и литературных данных о лунных метеоритах;
- поиск глубинного вещества в лунных метеоритах и оценка условий его образования;

- установление генетических взаимоотношений фрагментов магматических пород в лунном морском метеорите Dhofar (Dh) 287.

Научная новизна. Впервые проведено петрографо-минералогическое и геохимическое изучение 22-х новых лунных метеоритов, найденных в Омане и официально зарегистрированных в Номенклатурном комитете Метеоритного общества. Показано, что все изученные метеоритные находки представляют, по крайней мере, 7 различных падений. Впервые в лунных метеоритах обнаружены такие редкие типы лунного вещества, как стекла пикритового состава, породы ультраосновного и кислого состава, а также алюмоэнстатит-шпинелевые ассоциации, которые представляют собой глубинный материал. Дана оценка среднего состава лунной материковой коры, морских базальтов и лунной поверхности. Полученный состав лунной коры отличается более высокими содержаниями Al, чем это предполагалось по результатам изучения лунных образцов, и совместим с обогащением Луны труднолетучими элементами. Показано, что в морских районах преобладают низкотитанистые базальты, тогда как высокотитанистые базальты очень редки. Впервые установлено, что для образования всего многообразия пород морского метеорита Dh 287 необходимо присутствие трех родительских расплавов, два из которых могли образоваться в ходе ассимиляции KREEP материала пикритовой магмой.

Практическая значимость. Результаты исследования представляют интерес для планирования изучения Луны с помощью космических аппаратов и практического освоения лунных минеральных ресурсов.

Основные защищаемые положения.

1. Лунные метеориты Омана составляют 40% всех лунных метеоритных находок и представлены материковыми, морским и смешанными метеоритами, которые представляют, по меньшей мере, 7 различных падений.

2. Материковая лунная кора Луны богаче алюминием и беднее несовместимыми элементами, чем считалось ранее, что подтверждает модель лунного океана магмы и обогащение Луны труднолетучими элементами. В морских районах доминируют низкотитанистые базальты, высокотитанистые базальты имеют ограниченное распространение.

3. Глубинный материал лунной коры и, возможно, материал верхней мантии содержит алюмоэнстатит, оливин, шпинель, плагиоклаз и, по крайней мере, в некоторых областях не отличается по магнизальности от вещества земной верхней мантии.

4. В лунном морском метеорите Dh 287 присутствуют различные типы базальтовых пород, отличающихся по составу, скорости остывания и условиям

формирования. В их образовании принимали участие процессы ассимиляции KREEP материала.

Фактический материал и методы исследования. В основу работы положены данные, полученные автором при детальном исследовании типовых образцов лунных метеоритов, хранящихся в Метеоритной коллекции РАН. Изучено 22 метеорита: Dh 025, 026, 280, 287, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 730, 731, 733, 925, 950, 960, 961, (всего 24 шлифа). Составлена база данных для морских и материковых пород доставленных экспедициями «Аполлон» и миссиями «Луна». Изучено около 400 различных фрагментов пород, присутствующих в лунных брекчиях; проведено компьютерное моделирование процессов равновесной и фракционной кристаллизации для некоторых пород. В работе использовались методы электронно-зондового микроанализа (примерно 10000 анализов, из которых половина выполнена автором); атомно-эмиссионной спектроскопии с индукционно-связанной плазмой (5), рентгенофлуоресцентного (5) и атомно-абсорбционного анализов (5), нейтронной активации (40).

Публикации и апробация работы. Результаты работы были представлены на 33, 34, 35, 36-ой Международных Лунно-планетных конференциях (Хьюстон, 2002, 2003, 2004, 2005), а также на 64 и 66-ой конференциях Международного Метеоритного общества (Рим, 2001, Мюнстер, 2003). По результатам исследования опубликовано 14 печатных работ (5 статей и 9 тезисов докладов).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, и 3 приложений, имеет объем 125 страниц и содержит 44 рисунка и 21 таблицу. Список литературы включает 201 наименование. Во введении показаны актуальность и основные направления изучения лунных метеоритов. В главе 1 на основании литературных данных представлены основные классификационные параметры лунных пород и метеоритов и их идентификационные признаки, а также история исследования Луны. Глава 2 содержит описание использованных методов исследования. Глава 3 содержит результаты исследования лунных метеоритов, найденных в провинции Дофар (Оман). В главе 4 представлены основные характеристики популяций материковых, морских и смешанных метеоритов и изложены результаты расчета состава лунной коры. В главе 5 обсуждается глубинный материал, обнаруженный в лунных метеоритах. Глава 6 посвящена морскому метеориту Dh 287. В заключении содержатся основные выводы работы.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю М.А.Назарову за неоценимую помощь в работе, полезные советы

и внимание на протяжении всех этапов исследования, а также А.В. Иванову, Д.Д. Бадюкову и всем коллегам из лаборатории метеоритики за поддержку и полезные советы, И.А.Рощиной, Г.М.Колесову, Д.Ю.Сапожникову и А.Л.Лоренцу (ГЕОХИ РАН) за помощь в получении аналитических данных. Автор благодарен коллегам из зарубежных лабораторий – Г.Курату и Ф.Брандштеттеру (Музей естественной истории, Вена, Австрия), Т.Нтафлосу (Отдел исследования литосферы Венского Университета, Австрия), Л.А.Тэйлору и Д.Тэйлор (Университет Теннесси, Ноксвилл, США) за плодотворное сотрудничество и поддержку в проведении этого исследования.

Исследования поддерживались стипендией А.П.Виноградова, грантами РФФИ 02-05-64981, 05-05-64472, 03-05-20008-БНТС_а; грантами NASA (JURRISS): NAG 5-1014 и NAG 5-11558, и Австрийской Академией Наук.

Глава 1. Лунные породы и лунные метеориты (по литературным данным).

В соответствии с геологической структурой и рельефом поверхности лунные породы подразделяются на две группы - материковые и морские. Первые представлены существенно полевошпатовыми породами, вторые – базальтами, в первом приближении сходными по составу с земными толеитовыми базальтами. *Материковые породы* преобладают в лунной коре и в основном представлены брекчиями габбро-норит-троктолит-анортозитового состава с ударно-расплавной, реже гранулитовой или обломочной матрицей. *Морские породы* составляют порядка 1% лунной коры. Эти типичные магматические породы обычно определяются как ильменитовые, оливиновые, пижонитовые, кристобалитовые и тридимитовые базальты (долериты, габбро).

Имеющиеся в литературе оценки состава лунной коры основаны на различных подходах и допущениях (Turkevich, 1973; Stoffler et al., 1985; Korotev et al., 1996; 1997). Широко используемый состав лунной материковой коры (Taylor, 1982) базируется на результатах геохимических исследований лунного вещества и орбитальных данных.

Лунные метеориты представляют собой новый тип образцов, доступных для лабораторного изучения. Это фрагменты пород, которые были выброшены с поверхности Луны в результате ударных событий и выпали на Землю. Они легко определяются среди остальных типов метеоритов. Их главные диагностические признаки: характерная минералогия, брекчированная структура и Fe/Mn отношение в оливинах (≈ 89) и/или низкокальциевых пироксенах (≈ 54), которое в лунных метеоритах выше, чем в SNC и HED метеоритах. Дополнительными

критериями лунного происхождения являются: земная изотопия кислорода, наличие Eu аномалии, находка типичных лунных акцессорных фаз (армолколит, пироксферроит, транквиллитит), специфический возраст формирования лунных пород и некоторые другие.

К настоящему времени на Земле найдено 133 фрагмента лунных метеоритов, которые представляют предположительно 63 различных падения. Показано, что имеющиеся в коллекциях лунные метеориты выброшены с Луны менее 10 млн. лет назад (Nishiizumi et al., 1996; Thalmann et al., 1996), и эти выбросы связаны с образованием небольших ударных кратеров диаметром менее 10 км (Semenova et al., 1992; Warren, 1994; Назаров и др., 2003). Максимальную глубину экскавации вещества при образовании кратера диаметром 10 км можно оценить в 1 км (Melosh, 1989). Таким образом, популяция лунных метеоритов характеризует современное состояние лунной коры до глубины менее 1 км. Случайный характер их выброса с лунной поверхности, а также их вещественная представительность предполагает, что эти метеориты могут быть использованы для оценки состава корового вещества Луны. Такой подход был впервые предложен в работе (Palme et al., 1991), и использовался также в работе (Korotev et al., 2003), в которой суммированы данные по 11 метеоритам материкового происхождения. Большое количество лунных метеоритов, найденных недавно в пустынных районах Земли, в частности в Омане, открывает новые возможности для развития этого подхода.

По составу лунные метеориты подразделяются на три группы: (1) материковые; (2) морские; (3) смешанные. В последних присутствует как материковый, так и морской материал, а часто и KREEP-компонент. Материковые метеориты наиболее распространены, и их вещественные характеристики, также как и свойства более редких смешанных метеоритов, отражают процессы, происходившие на Луне до окончания интенсивной метеоритной бомбардировки. Морские метеориты встречаются редко, но несут важную информацию о составе лунной мантии и процессах лунного магматизма после образования гигантских депрессий лунных морей.

Глава 2. Методы исследования.

Микроскопические исследования лунных метеоритов, хранящихся в метеоритной коллекции РАН, выполнялись в лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН и в Музее естественной истории, г. Вена, Австрия (NHMW). Электронно-микроскопическое изучение (JSM 6400) проведено в NHMW, а микронзондовый анализ – в Отделе исследования литосферы Венского Университета, Австрия

(Cameca SX-100) и в Университете Теннесси, США (Cameca SX-50). Валовый химический состав метеоритов определялся традиционными методами РФА и ИСП-АЭС, щелочные элементы – атомно-абсорбционным методом, содержания редких элементов – методом ИНАА в ГЕОХИ РАН.

Глава 3. Лунные метеориты Омана.

Число и масса лунных метеоритов Дофар (Оман). К настоящему времени в районе Дофар Омана (~10 тыс. км²) обнаружено более 1400 метеоритных находок общим весом более 1450 кг. Столь высокая концентрация метеоритов указывает на большой экспозиционный возраст этой поверхности, означающий, что значительное время здесь не происходило интенсивных процессов седиментации и эрозии. В то же время засушливый пустынный климат способствовал сохранности метеоритов на земной поверхности. Лунные метеориты этого района (на сегодняшний день их 53) составляют 40% (по количеству) и 14% (по массе) всех лунных метеоритов, найденных на Земле, и ~4% всех метеоритов этого района. Их общая масса составляет 2.3 кг.

Вещественная характеристика лунных метеоритов Омана. Все изученные метеориты представлены брекчиями, среди которых резко доминируют брекчии с частично или полностью раскристаллизованной ударно-расплавной матрицей. По содержанию Sc, которое отражает количество пироксена, и магнетиальности эти метеориты достаточно четко подразделяются на следующие группы: (1) ферроанортозиты; (2) норитовые анортозиты; (3) троктолитовые анортозиты; (4) смешанные метеориты и (5) морские базальты. Три первые группы имеют материковое происхождение (рис. 1). Смешанные и морские метеориты обладают большими содержаниями Sc (20-103 мкг/г). На территории Омана к настоящему времени обнаружен только один метеорит морского происхождения (Dh 287, см. главу 6).

Метеориты состава норитовых анортозитов. По содержанию Sc и магнетиальности метеориты Dh 025, 301, 304, 308 (группа Dh 025) относятся к норитовым анортозитам, как и большинство антарктических лунных метеоритов (рис. 1). Главные минералы: An₉₄₋₉₈, Fo₆₁₋₈₂, En₆₄₋₈₇Wo₂₋₅, En₄₃₋₇₇Wo₅₋₄₅. В этих брекчиях обнаружены также единичные фрагменты очень низкотитанистых базальтов (VLT), состоящие, главным образом, из плагиоклаза (An₉₁₋₉₆), клинопироксена (En₁₋₅₆, Wo₁₃₋₄₀) и второстепенного оливина (Fo₁₀₋₆₆). Метеорит Dh 026 по содержанию Sc также попадает в область норитовых анортозитов (рис. 1), но

в нем преобладает ферроанортозитовый материал (An_{95-99} , Fe_{56-84} , En_{36-76} Wo_{6-38}) и наблюдаются необычные сферические объекты.

Метеориты ферроанортозитового состава. Изученный нами метеорит Dh 280 по химическому составу относится к ферроанортозитам и существенно не отличается от метеорита Dh 081, найденного поблизости. Для них характерно низкое содержание Sc и низкая магниальность. Они сложены преимущественно плагиоклазом (An_{94-98}) с второстепенными оливином (Fe_{55-78}), низкокальциевым и высококальциевым пироксеном (En_{48-49} Wo_{3-5} , En_{31-48} Wo_{5-41}).

Метеориты состава троктолитовых анортозитов. Dh 302, 303, 305, 306, 307, 309, 310, 311, 730, 731 и 950 (группа

Dh 302) в основном имеют сходные химические составы. Большинство из них характеризуется высокой магниальностью и низким содержанием Sc, что отличает эти метеориты от других материковых метеоритов (рис. 1). Основные минералы: плагиоклаз (An_{94-99}), оливин (Fe_{63-85}), низкокальциевый (En_{76-84} Wo_{2-4}) и высококальциевый пироксен (En_{46-77} Wo_{7-47}). В некоторых метеоритах этой группы найдены редкие фрагменты ультраосновных пород: дунитов, пироксенитов, лерцолитов, состоящих главным образом из оливина (Fe_{51-75}), низкокальциевого и высококальциевого пироксенов (En_{52-75} Wo_{2-5} и En_{40-72} Wo_{5-45} , соответственно) в различных соотношениях с второстепенным плагиоклазом (An_{88-98}). К группе троктолитовых анортозитов относится и *метеорит Dh 733* с гранулитовой структурой, который имеет незначительные вариации состава минералов (An_{89-96} , Wo_{4-5} En_{73-76} , Wo_{36-40} En_{48-52} , Fe_{71-76}).

Смешанные метеориты. Dh 925, 960 и 961 (группа Dh 925) содержат разнообразную популяцию фрагментов горных пород. В качестве основных компонентов в них присутствует типичный материковый материал, VLT мор-

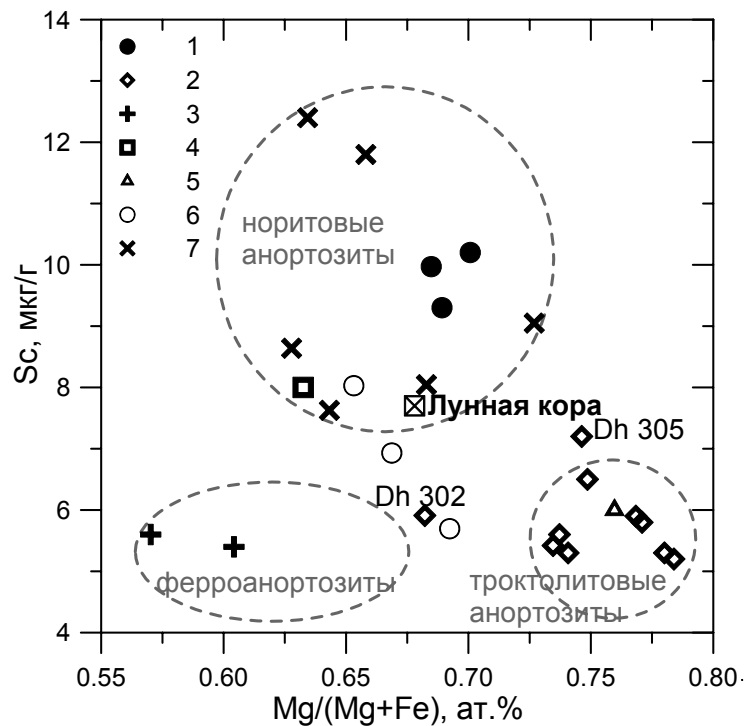


Рис. 1. Магниальность и содержание Sc в лунных материковых метеоритах.

1 – метеориты группы Dh 025; 2 – метеориты группы Dh 302; 3 – метеориты группы Dh 280; 4 – Dh 026; 5 – Dh 733; 6 – другие пустынные метеориты; 7 – антарктические метеориты.

ские базальты, а также породы, содержащие KREEP. В этих же метеоритах установлены обогащенные Fe породы, сложенные фаялитом, железистым авгитом, геденбергитом, ильменитом и фазой кремнезема, которые известны среди морских базальтов. Наблюдались также редкие фрагменты (размером 30-250 мкм) гранитного состава, состоящие из калиевого полевого шпата ($An_{1-10}Or_{85-89}$), фазы кремнезема и K, Al, Si-мезостазиса с пироксенами ($En_{40}Wo_{20}$, $En_{41}Wo_6$) и плагиоклазом ($An_{74-94}Or_{0.9-1.5}$) в подчиненном количестве. Ранее такие породы были найдены главным образом в образцах «Аполлона 12 и 14».

Таким образом, среди метеоритов Омана присутствуют представители материковых, морских и смешанных метеоритов. В них, помимо распространенных типов пород, присутствуют такие редкие типы, как ультраосновные породы, гранитный, монцодиоритовый и пикритовый материал. Можно считать, что по вещественным характеристикам лунные метеориты характеризуют состав лунной коры не хуже, чем собранные на Луне образцы.

Парность метеоритов Дофара. Парными при падении являются метеоритные фрагменты, образующиеся при распаде одного метеороида в атмосфере Земли. Определение парности необходимо для понимания связи между различными находками метеоритов. Признаками парности являются: сходство состава, близость расположения, и одинаковый земной возраст. Сходства вещественного состава часто недостаточно для определения парности, так как большинство лунных метеоритов представлено полимиктовыми брекчиями. Близость расположения для района Дофар имеет большое значение, поскольку на этой территории не наблюдается признаков переотложения метеоритных находок и, вероятнее всего, найденные рядом метеориты являются парными. Однако большой экспозиционный возраст поверхности в этом районе может привести к наложению фрагментов различных падений. В случае пустынных метеоритов относительный земной возраст качественно может быть оценен по содержанию Ba и Sr, которые привносятся в них в ходе земного выветривания.

Морской метеорит Dh 287 и материковые метеориты группы Dh 025 найдены рядом, однако, скорее всего, не являются парными, т. к. Dh 287 не содержит типичного материкового вещества и имеет более низкую степень выветривания.

В районе находки Dh 280 можно выделить 2 группы метеоритов: более молодые Dh 280/081 с низкими содержаниями Ba и Sr, сопоставимыми с неизменными антарктическими находками, и более древние метеориты группы Dh 302 (рис. 2). Последние представляют собой другое и, возможно, не одно, падение, поскольку метеориты Dh 302 и 305 обладают некоторой геохимиче-

ской спецификой (рис. 1), а метеорит Dh 303 имеет отличное от других метеоритов данной группы содержание благородных газов (Шуколюков и др., 2004).

Смешанные метеориты группы Dh 925 обнаружены рядом с материковым метеоритом Dh 489, однако последний не содержит фрагментов морских базальтов и имеет очень узкие вариации составов минералов (Takeda et al., 2003). Тем не менее, Dh 489 может представлять материковый фрагмент метеоритного дождя Dh 925.

В районе находки Dh 026 обнаружено еще 12 лунных метеоритов Dh 457-468. По предварительным данным они являются парными по минералогическим петрографическим признакам и, скорее всего, представляют одно падение.

Метеорит Dh 733 найден далеко от других метеоритов, отличается от них по структуре, и его можно рассматривать как отдельное падение.

Таким образом, основываясь на петрографическом и химическом сходстве и локализации находок, среди изученных метеоритов в районе Дофар можно выделить, по крайней мере, 7 различных падений лунных метеоритов, которые представлены в основном метеоритными дождями: 1) Dh 025/301/304/308; 2) Dh 280/081; 3) Dh 302, 303, 305, 307, 309, 310, 311, 730, 731, 950; 4) Dh 026/457-468; 5) Dh 733; 6) Dh 925/960/961; 7) Dh 287.

Глава 4. Состав лунной коры.

Методология определения состава лунной коры. Состав лунной коры отражает процессы ее формирования, так же как и состав первичного лунного вещества, и, следовательно, особенности образования Луны. Случайное распределение по поверхности Луны ударных событий, вызывающих перенос вещества на Землю, предполагает представительность популяции лунных метеоритов по отношению к составу лунной коры. Следовательно, распространенность в лунной коре определенных типов пород должна бы просто соответство-

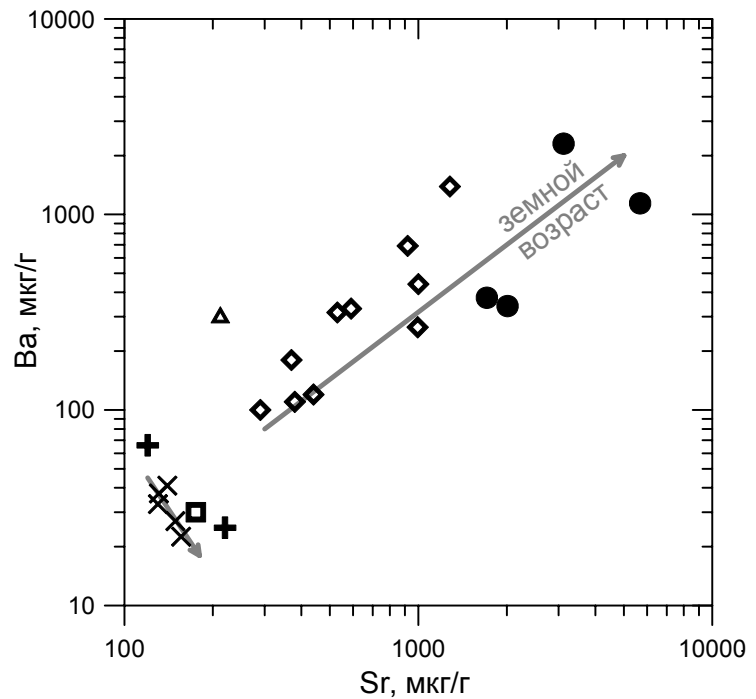


Рис. 2. Содержания Ba и Sr в материковых метеоритах Дофара. Условные обозначения см. рис.1.

вать соотношению числа определенных типов лунных метеоритов. Однако многие лунные находки являются парными, т.е. число находок всегда больше числа падений. Определение парности, как указывалось выше, не является простой задачей. Это обстоятельство затрудняет оценку состава лунной коры, основываясь на числе находок лунных метеоритов.

В качестве альтернативного подхода в определении состава лунной коры можно предположить, что массовые отношения различных типов пород лунной коры пропорциональны массовым отношениям соответствующих типов лунных метеоритов. То есть фрагмент большей массы должен быть с большей вероятностью выброшен из петрографической провинции, занимающей большую площадь, или на территории такой провинции возможно большее число ударных событий, что должно бы привести к выбросу большей массы лунных метеоритов. При таком подходе предполагается, что состав лунной коры соответствует средневзвешенному составу лунных метеоритов (с учетом их массы), что снимает проблему парности. Однако этот подход более чувствителен к статистическому объему популяции, поскольку случайные вариации масс метеоритов могут быть значительными, что понижает точность и может вызвать смещение оценки среднего значения. Так, например, можно сказать, что самый большой лунный метеорит Kalahari 009 (13.5 кг) найден «преждевременно»: он выпадает из общего распределения лунных метеоритов по массам. Несмещенные оценки достигаются только при достаточно большой статистике.

В настоящее время статистический объем популяции лунных метеоритов не очень значителен, зарегистрировано 133 метеорита общей массой 38,1 кг. В работе использованы наши и литературные данные о 64 фрагментах лунных метеоритов, представляющих, вероятно, 26 различных падений. Содержания Ir и Ga в некоторых метеоритах оценивались по регрессиям Ni-Ir, Al-Ga. При оценке средних концентраций Ba и Sr, привносящихся в лунные метеориты в ходе земного выветривания, учитывались результаты анализа только антарктических находок. Для расчета состава материковой коры, морских базальтов и лунной поверхности был получен средний и средневзвешенный (с учетом массы каждого метеорита) состав популяций материковых, морских и смешанных метеоритов.

Материковая популяция содержит 14 материковых метеоритов, составляющих 62% по массе и 54% по числу падений от всех лунных метеоритов в нашей выборке. Популяция морских метеоритов насчитывает 7 метеоритов и составляет 27% по числу падений и 32% по массе от всех лунных метеоритов, рассматриваемых в этой работе. Популяция смешанных метеоритов насчитыва-

ет 5 метеоритов, составляющих 19% от числа лунных падений и 6% от их общей массы.

Материковая популяция. По химическому составу все материковые метеориты отвечают норитовым или троктолитовым анортозитам, которые характеризуются очень небольшим разбросом содержаний главных и редких элементов. Для них, также как и для всех лунных материковых пород, характерно обогащение легкими р.з.э. и положительная аномалия Eu. Материковые метеориты, так же как и все лунные импактные брекчии и лунный реголит, обладают повышенными относительно материковых магматических пород и морских базальтов содержаниями сидерофильных элементов, что связано с присутствием метеоритного вещества. Соотношения Ni и Co в них являются хондритовыми и предполагают фоновое содержание Co в материковых породах около 10 мкг/г. Отношение Ir/Ni в материковых метеоритах также близко к хондритовому.

Морская популяция. Морские метеориты сильно варьируют по составу, их магнезиальность изменяется от 31 до 65 мол. %. Большинство относится к низкотитанистым (LT) базальтам, однако VLT базальты тоже присутствуют. Также как и большинство лунных LT базальтов, морские метеориты в основном являются оливин-нормативными (рис. 3).

Они обладают отрицательной аномалией Eu, и многие обогащены легкими р.з.э. (есть и исключения), в то время как типичные морские лунные базальты обеднены этими элементами. Содержания Ni и Co в морских метеоритах сходны с морскими лунными породами, в отличие от содержаний Ir и Au, которые в целом выше.

Смешанная популяция. По валовому составу смешанные метеориты отвечают анортозитовым норитам или высокоглиноземистым базальтам, то есть находятся в поле составов лунных материковых пород (рис. 3). Однако по содержанию литофильных и сидерофильных элементов смешанные метеориты занимают

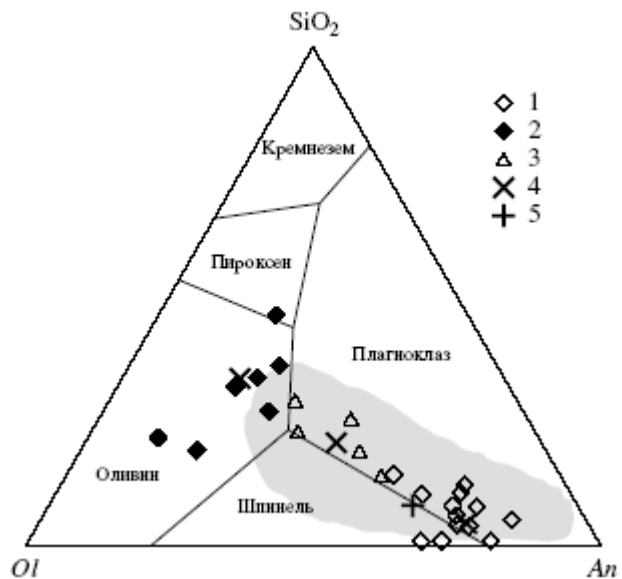


Рис. 3. Нормативные составы (мол.%) лунных метеоритов на диаграмме оливин (Fo₇₀)-анортит-кремнезем. 1, 2, 3 – материковые, морские и смешанные метеориты соответственно; 4 – средние составы этих метеоритов; 5 – состав материковой лунной коры (Taylor, 1982). Показана также область составов лунных материковых пород «Аполлона 16» и «Луны 20».

промежуточное положение между морскими и материковыми. Морской материал в изученных нами и всех других смешанных лунных метеоритах представлен практически исключительно VLT базальтами. Однако эти базальты характеризуются более высокой магнезиальностью, чем VLT базальты «Луны 24», и, скорее похожи на VLT базальты «Аполлона 17». В некоторых смешанных метеоритах присутствует KREEP материал.

Состав лунной коры по лунным метеоритам. По геологическим данным предполагается, что в лунной коре доминируют материковые породы и доля морских базальтов не превышает 1% (Head, Wilson, 1992). Распространенность KREEP материала остается неизвестной, но также невелика. Таким образом, средний состав материковых лунных метеоритов представляет собой оценку валового состава лунной коры, во всяком случае, древней коры с возрастом более 4 млрд. лет, до массового излияния неморских и морских базальтов. Средний состав материковых метеоритов, рассчитанный нами, хорошо совпадает с оценкой состава материковой коры, полученной по 11 метеоритам (Korotev et al., 2003) (табл.1). По сравнению с наиболее популярной оценкой состава материковой коры (Taylor, 1982), «метеоритная оценка» отличается более высокими содержаниями Ca и Al (т.е. плагиоклаза), и, напротив, более низкими содержаниями Fe, Mg и несовместимых элементов (табл. 1), то есть полученный состав не является котектическим, что согласуется с концепцией океана магмы. По последним орбитальным данным (аппараты Lunar Prospector и Clementina) средняя концентрация Th в преобладающих материковых породах обратной стороны Луны составляет 0.4 мкг/г, а содержание FeO – 4.4 мас.% (Gillis et al., 2004), что хорошо соответствует метеоритным данным. Таким образом, средний состав материковых метеоритов, по-видимому, правильно отражает состав материкового материала, доминирующего в лунной коре.

Средний химический состав морских метеоритов предполагает, что в морских районах Луны доминируют LT базальты, в среднем содержащие 2.3 ± 0.3 мас.% TiO_2 (табл. 1). Высокотитанистые базальты, типичные для образцов «Аполлона 11 и 17», должны иметь ограниченное распространение. Этот вывод согласуется с результатами орбитальных исследований, которые показывают, что в морских районах преобладают базальты, содержащие 2-4 мас.% TiO_2 (Giguere et al., 2000). Однако согласно орбитальным данным (Gillis et al., 2004) содержание FeO в лунных морях должно быть систематически меньше (<21 мас.%), чем это предсказывает химия морских метеоритов.

Таблица 1. Оценки химического состава лунной материковой коры.

	Материковая кора		Материковые метеориты (лунная материковая кора)			Морские метеориты			Смешанные метеориты			Лунная поверхность
	[1]	[2]	срвзв.	ср.	объед. ср.	срвзв.	ср.	объед. ср.	срвзв.	ср.	объед. ср.	*
SiO ₂	45	44.7	44.2	44.3	44.2	46.4	45.6	46.0	46.2	46.3	46.3	45.0
TiO ₂	0.56	0.22	0.21	0.24	0.22	2.46	2.06	2.25	0.52	0.59	0.54	0.86
Al ₂ O ₃	24.6	28.2	28.7	28.2	28.5	9.20	9.89	9.41	19.7	19.3	19.5	21.7
Cr ₂ O ₃	0.1	0.096	0.09	0.10	0.09	0.34	0.34	0.34	0.23	0.23	0.23	0.18
FeO	6.6	4.4	4.03	4.40	4.12	20.9	21.2	21.0	11.0	11.4	11.2	10.1
MnO	-	0.063	0.06	0.06	0.06	0.28	0.28	0.28	0.13	0.14	0.13	0.13
MgO	6.8	5.4	4.72	5.22	4.90	9.04	9.55	9.32	8.34	8.18	8.30	6.69
CaO	15.8	16.3	17.0	16.5	16.8	10.3	10.6	10.4	13.4	13.7	13.5	14.5
Na ₂ O	0.45	0.35	0.35	0.37	0.36	0.34	0.35	0.34	0.40	0.41	0.40	0.36
K ₂ O	0.07	0.027	0.05	0.04	0.05	0.09	0.09	0.09	0.08	0.12	0.09	0.07
MG#	64.7	69	67.6	67.9	67.8	43.5	44.5	44.2	57.5	56.1	56.9	54.2
Sc	10	8.0	7.5	8.1	7.7	57.3	59.5	58.1	25.0	26.1	25.6	25
Co	15	17	14.9	16.9	15.4	43.9	43.1	43.5	39.3	36.5	38.6	27
Ni	100	185	148	176	154	58	58	58	141	206	162	128
Sr	120	150	155"	150"	152	125"	108"	123	114"	126"	118	140
Ba	66	33	29"	32"	30	129"	74"	101	94"	137"	104	64
La	5.3	2.3	2.15	2.15	2.15	11.5	9.3	10.5	6.0	9.3	6.8	5.4
Eu	1	0.78	0.85	0.94	0.87	1.10	1.04	1.06	0.76	0.86	0.80	0.93
Yb	1.4	0.89	0.78	0.82	0.80	5.36	4.34	4.81	2.4	3.5	2.6	2.3
Ir	-	7.5	6.3	7.7	6.7	0.9	1.1	1.0	15.6	11.8	13.7	5.6

Главные элементы – в масс. %, Au, Ir – нг/г, остальные – мкг/г, MG# = Mg/(Mg+Fe), мол.%

[1] компиляция орбитальных и геохимических данных (Taylor, 1982); [2] среднее по лунным метеоритам (Korotev et al., 2003); * – объединенное (по падениям и массам) среднее для всех лунных метеоритов; " – среднее только для антарктических метеоритов.

Химические особенности популяции морских метеоритов указывают на разнообразии лунных морских пород, а орбитальные данные предполагают, что не все их типы были опробованы космическими экспедициями (напр., Wiczorek et al., 2006).

По содержанию большинства элементов средний состав популяции смешанных метеоритов занимает промежуточное положение между материковыми и морскими лунными метеоритами и похож на низкокалийевые брекчии Фра Мауро, распространенные в образцах «Аполлона 14», отличаясь от последних более низкими содержаниями Ti и р.з.э.. Можно предполагать, что популяция смешанных метеоритов характеризует состав переходных зон море/материк. Характерной особенностью таких переходных зон могло бы быть присутствие магнезиальных VLT базальтов.

Осреднение геохимических данных по всем лунным метеоритам позволяет получить среднюю оценку состава лунной поверхности, которая должна отражать средний состав лунного реголита, образующийся за счет ударной переработки приповерхностных пород. По содержанию FeO этот состав совместим с результатами орбитальных измерений, которые дают среднюю концентрацию FeO на лунной поверхности 8.6 мас.% (Gillis et al., 2004).

Некоторые ограничения на общий состав Луны. Предполагается, что Луна в целом обеднена легколетучими элементами. Высокие содержания Al в нашей метеоритной оценке состава лунной коры согласуются с этим предположением. Однако коровые концентрации элементов прямо не отражают их концентрации в первичном лунном веществе и во многом определяются процессами магматического фракционирования. Согласно модели лунного океана магмы материковую кору в первом приближении можно рассматривать как смесь плагиоклаза и родительской магмы, из которой этот плагиоклаз аккумуляровался. Такая магма должна иметь котектический состав, насыщенный, по крайней мере, оливином и плагиоклазом (рис. 3) и отражающий состав источника (первичного лунного вещества). Ее состав можно оценить, пользуясь методами математического моделирования магматической кристаллизации (Ariskin et al., 1997), этот расплав не имеет позитивной Eu-аномалии (табл. 2). Зная долю материковой коры в этой магме и ее общую массу, можно показать, что масса расплава должна составлять примерно 17% массы всей Луны. Предполагая, что этот расплав – продукт фракционирования всего вещества Луны, т.е., например, результат 17% частичного плавления, можно оценить состав источника (т.е. состав Луны в целом). Для этого к котектической магме добавляется соответствующее количество оливина, так чтобы при 17% частичном плавлении источника дос-

тигался бы состав родительской магмы. Полученный таким образом состав источника (табл. 2) дает минимальную оценку содержания несовместимых элементов и показывает, что лунное вещество действительно может быть обогащено труднолетучими (р.з.э.), и обеднено летучими (Na) и сидерофильными (Co) элементами по отношению к CI хондритам.

Если родительская магма материковой коры образовалась путем частичного плавления только некоторой части Луны, тогда содержания несовместимых элементов в источнике должны быть больше. Так, при частичном плавлении только внешней 400 км оболочки Луны (предполагаемая глубина океана магмы) получим 35% степень плавления и состав первичного вещества близкий к оценке общего состава Луны, данный в работе (Taylor, 1982) на основе компиляции геохимических и геофизических данных. Следует, однако, подчеркнуть, что отношения Sc/La, Ti/La, La/Al, La/Yb в наших оценках состава первичного вещества не являются хондритовыми (табл. 2).

Таблица 2. Составы родительской магмы лунной коры и ее источника при различной степени частичного плавления.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	Sc	Co	La	Eu	Yb
Лунная кора	44.2	0.22	28.5	4.12	4.90	16.8	0.36	7.7	15.4	2.15	0.87	0.80
Родительская магма	46.0	0.66	17.5	10.1	10.3	14.4	0.46	21.3	36.4	4.67	0.90	2.33
Источник, 17% плавления	41.0	0.11	3.0	13.6	39.6	2.5	0.08	3.6	6.1	0.75	0.15	0.39
Источник, 35% плавления	42.1	0.23	6.1	12.9	33.3	5.1	0.16	7.5	12.7	1.60	0.32	0.82
Состав Луны	43.4	0.30	6.0	13.0*	32.0	4.5	0.09	19	-	0.90	0.21	0.61
CI хондриты	33.4	0.11	2.44	35.0	23.4	1.95	1.06	7.8	765	0.37	0.09	0.25

Главные элементы – в мас.%, остальные – мкг/г. * 10.7 мас.% FeO в лунной мантии (Taylor, 1982);

Составы Луны и CI хондритов из работы (Taylor, 1982). Коррекции на метеоритный Co в лунной коре не сделано и, поэтому, концентрации эндогенного лунного Co в наших оценках должны быть ниже приведенных значений.

Глава 5. Глубинный материал лунной коры.

Шпинелевые катаклазиты – это редчайший тип лунных пород, описанный в некоторых материковых брекчиях «Аполлона 15 и 17». Они характеризуются следующей минеральной ассоциацией: магнезиальный оливин + богатый Al ортопироксен + шпинель + плагиоклаз (табл. 3). Эти породы по катакластической структуре и присутствию шпинели получили название шпинелевых катаклазитов. Считается, что они имеют глубинное происхождение.

Таблица 3. Составы минералов в шпинель-энстатитовых ассоциациях и шпинелевых катаклазитах.

	15445*	72435*	77517*	310-M3	309-M4	Сростки	Мин. фр.
Al-En	En ₉₁₋₉₂	En ₆₅₋₇₈	En ₈₉₋₉₁	En ₈₉	En ₈₉	En ₈₅₋₉₀	En ₈₂₋₉₂
Al ₂ O ₃ , мас. %	2-6.3		3.3-6.7	6.8-7.3	6.0-11.5	2.2-8.6	2.2-9.4
Ol	Fo ₈₈₋₉₁	Fo ₇₂	Fo ₈₉₋₉₀	Fo ₈₉	Fo ₈₁₋₈₈	Fo ₈₇₋₉₀	
Pl	An ₈₈₋₉₈	An ₉₄₋₉₈	An ₉₆₋₉₈	An ₉₇	An ₉₆	An ₉₇₋₉₉	
Sp							
Fe/(Fe+Mg)	0.19	0.31-0.56	0.20-0.38	0.20	0.19-0.30	0.19-0.22	
Cr/(Cr+Al)	0.13	0.03-0.21	0.08-0.29	0.04	0.04-0.13	0.05-0.10	

* (Warner et al., 1978)

В изученных лунных метеоритах впервые были идентифицированы минеральные фазы, аналогичные фазам шпинелевых катаклазитов. Так богатые Al энстатиты обнаружены и исследованы в метеоритах Dh 302, 303, 305, 306, 307, 309, 310, 311, 730, 950, 1436 и SaU 449, которые представляют, по меньшей мере, 3 различных падения. Кроме того, в этих метеоритах найдено два фрагмента пород (130-400 мкм), содержащих алюмоэнстатит, 8 сростков с другими фазами (в основном с оливином и (или) плагиоклазом) и 50 мономинеральных фрагментов алюмоэнстатита размером до 70 мкм (табл. 3). Найденные зерна неотличимы по составу от ортопироксенов шпинелевых катаклазитов, но значительно отличаются от обычных ортопироксенов лунных метеоритов (рис. 4). Характерными чертами богатых Al ортопироксенов является их высокая и практически одинаковая магнезиальность (около 90 мол.%), а также очень низкие содержания Ca (преимущественно <1 мас.% CaO). Все богатые Al ортопироксены характеризуются прекрасной стехиометрией.

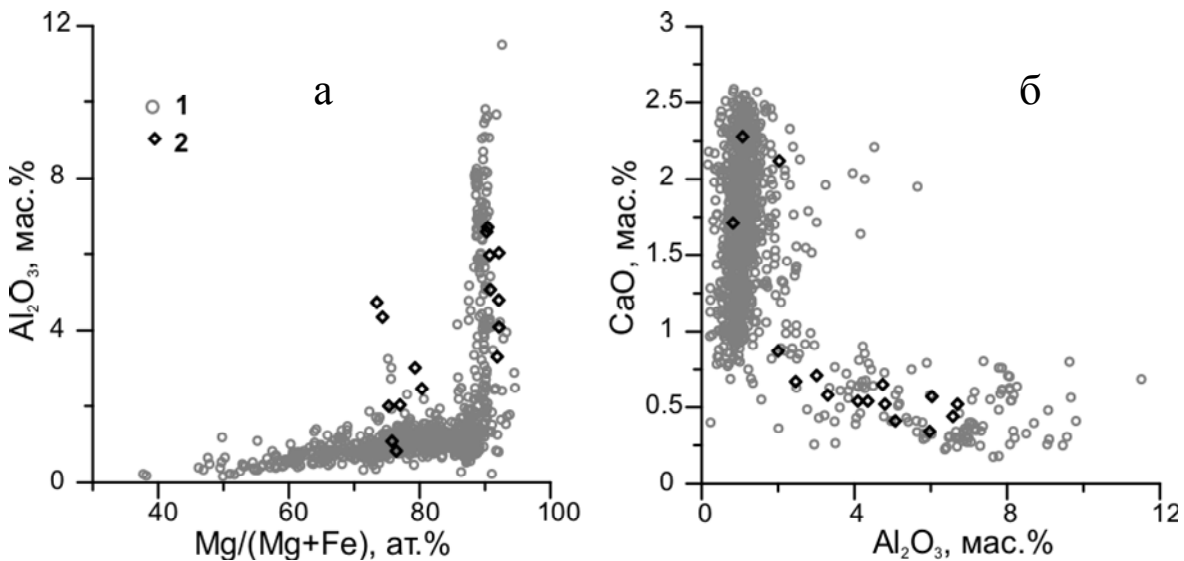
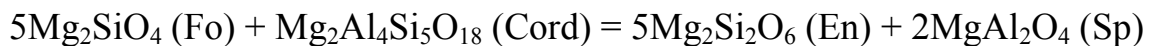


Рис. 4. Содержание Al₂O₃ - Mg/(Mg+Fe) (а) и CaO - Al₂O₃ (б) в ортопироксенах (Wo < 5 мол.%) лунных материковых метеоритов (1) и шпинелевых катаклазитов из образцов экспедиций «Аполлон» (2) Составы пироксенов шпинелевых катаклазитов заимствованы из литературы.

В одном класте и, по меньшей мере, в двух сростках шпинель образует червеобразные выделения в алюмоэнстатите (рис. 5), что не характерно для лунных материковых пород, где она представлена округлыми октаэдрическими кристаллами. Подобные срастания шпинели и энстатита являются результатом твердофазных (метаморфических) превращений. Такие сростки характерны для земных мантийных ксенолитов (Mercier, Nicolas, 1975), в которых они наблюдаются в периферических частях зерен энстатита и приурочены к контактам с клинопироксеном. Предполагается (Mercier, Nicolas, 1975), что в данном случае клинопироксен и шпинель могут быть продуктами распада обогащенного Al и Ca энстатита или богатого Al пижонита. Однако в лунных метеоритах, несмотря на тщательные поиски, клинопироксен в ассоциации с алюмоэнстатитом не установлен. В качестве акцессорных минералов в более крупных кластах присутствуют рутил, фаза, богатая Zr и Ti, Fe,Ni-металл ($Ni > 56$; $Co > 1.5$ мас.%) и сульфид.

Замечено, что все фрагменты, содержащие алюмоэнстатит, находятся в слабо раскристаллизованной ударно-расплавной матрице и не наблюдаются в матрице с хорошей степенью кристалличности, что свидетельствует о неравновесности этих фрагментов с расплавами, имеющими состав верхней коры.

Для оценки P-T параметров образования ассоциаций, содержащих алюмоэнстатит, были предложены (Herzberg, Baker, 1980) реакции:



и суммарно: $5(1-x)Fo + Cord = 5[(1-x)En + xMgTs] + (2-5x)Sp$,

где x – мольная доля $MgAl_2SiO_6$.

В лунных парагенезисах, содержащих алюмоэнстатит, кордиерит (Cord) не наблюдался, за исключением кластов в брекчиях 72435,8 и 15295 (Herzberg, Baker, 1980; Marvin et al., 1989). Поэтому предполагалось, что такие парагенезисы образовались при P-T параметрах, при которых кордиерит не устойчив. Процедура расчетов, предложенная в работах (Herzberg, 1978; Herzberg, Baker, 1980), учитывает концентрации Fe, Cr и Ti в сосуществующих фазах и позволя-

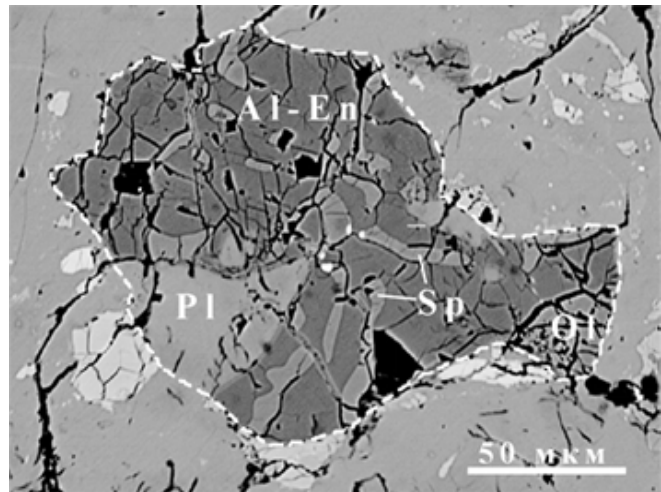


Рис. 5. Фрагмент 310-МЗ, состоящий из алюмоэнстатита, шпинели, анортита и форстерита. Метеорит Dh 310.

ет оценить минимальное давление, при котором стабильна ассоциация алюмоэнстатит+шпинель, и равновесную температуру. В настоящей работе использована эта методология с некоторыми дополнительными допущениями. Так, для сростков и мономинеральных зерен магнезиальность отсутствующего оливина принималось равной магнезиальности пироксена, а магнезиальность и $Al/(Al+Cr+Ti)$ отсутствующей шпинели оценивались по регрессиям с соответствующими параметрами алюмоэнстатита в полных ассоциациях и сростках из лунных метеоритов и шпинелевых катаклазитов.

Результаты расчетов как для шпинелевых катаклазитов из образцов миссий «Аполлон», так и лунных метеоритов, показаны на рис. 6. Полученные оценки температур находятся в интервале 580-1150 °С. Для большей части зерен алюмоэнстатита минимальная глубина образования составляет около 20 км и не превышает 35 км, что соответствует средней (по глубинности) части лунной коры и не противоречит рассчитанной селенотерме (Toksöz, Johnston, 1977). Максимально возможное давление, при котором рассматриваемые парагенезисы могут быть стабильными, определяются фазовыми равновесиями, очень чувствительными к валовому химическому составу пород, и материковые породы верхней коры не могут произвести такие ассоциации. Только для состава шпинелевого троктолита с пониженным содержанием Са присутствует большое поле стабильности лунного парагенезиса $Ol+Opx+Sp+An$ (рис. 6). Максимально возможные глубины для существования рассматриваемых парагенезисов составляют примерно 150-170 км и определяются стабильностью

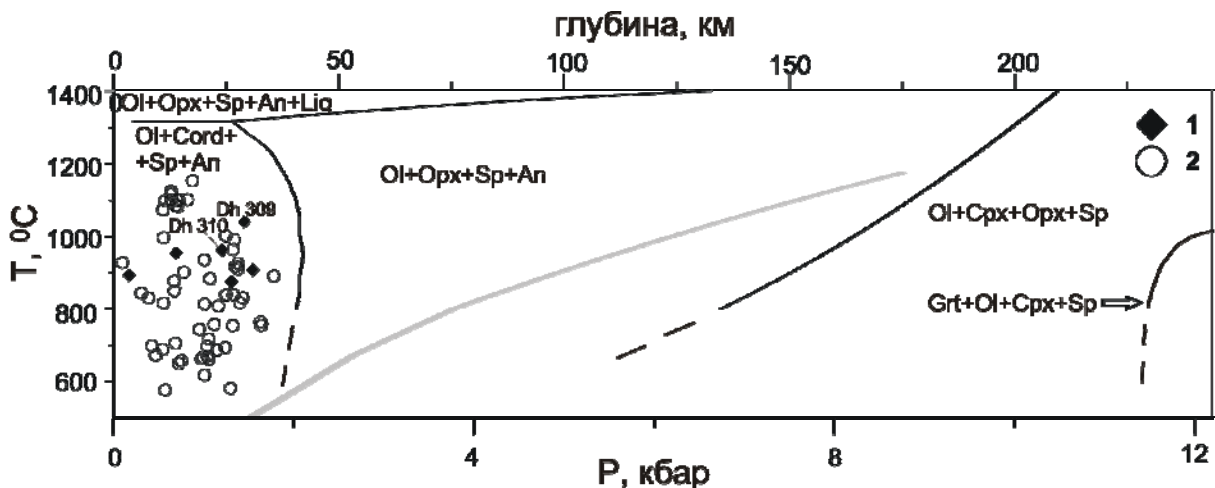


Рис. 6. Расчитанные P T условия образования алюмоэнстатита. Черные линии - рассчитанные поля стабильности лунных минеральных ассоциаций в шпинелевом троктолите с пониженным содержанием Са. Серая линия – селенотерма 3.9 млрд. лет назад (Toksöz, Johnston, 1977). 1 - фрагменты пород из образцов миссий «Аполлон» и лунных метеоритов; 2 – сростки и мономинеральные фрагменты алюмоэнстатита.

плагиоклаза. При больших давлениях плагиоклаз исчезает и появляется клинопироксен, который в ассоциации с алюмоэнстатитом не наблюдался. Следовательно, парагенезисы, содержащие алюмоэнстатит + шпинель, имеют глубинное происхождение и должны существовать в средней коре или в верхней мантии Луны, и при этом медленного поднятия таких пород к поверхности до глубин, на которых возможно появление кордиерита, практически не происходило.

Единственным процессом, способным приводить к переносу глубинного материала на поверхность Луны, являются ударные события. Глубина экскавации крупнейшей на Луне, и возможно крупнейшей в Солнечной системе, ударной структуры Южный полюс – Эйткен оценивается в ~350 км, а по минимальной оценке в 150 км (Hammond et al., 2009). Определенно в выбросах этой структуры должен присутствовать не только материал нижней коры (мощность лунной коры порядка 60 км), но и материал мантии. Выброшенный на поверхность крупными ударами глубинный материал в дальнейшем мог быть перераспределен по поверхности Луны более мелкими ударными событиями.

Валовый химический состав источника шпинель-алюмоэнстатитовых ассоциаций пока невозможно установить, поскольку фрагменты таких пород слишком малы как в лунных образцах, так и в лунных метеоритах. Однако качественный минеральный состав этого источника уже известен. В нем присутствуют оливин, плагиоклаз, алюмоэнстатит, шпинель и в аксессуарных количествах рутил, металл и сульфид. При этом оливин может быть доминирующей фазой. Клинопироксен отсутствует. Магнезиальность лунных алюмоэнстатитов (89.5 ± 1.4 ат.%) и земной мантии (89.4 ат.%) (Warren, 2005) поразительно совпадают, что может служить указанием на вещественное тождество лунной и земной мантий. Однако геохимические ограничения на состав мантийного вещества в области генерации морских базальтов и геофизические данные (напр., Taylor et al., 2006; Кусков, Кронрод, 1999) предполагают, что лунная мантия по сравнению с земной должна бы быть менее магнезиальной ($Mg/(Mg+Fe) \sim 82$ ат.%, и ее магнезиальность может даже уменьшаться с глубиной. По этой причине источник шпинелевых катаклазитов экспедиций «Аполлон» помещался в основание коры, а не в верхнюю мантию. Однако отмечалось, что морские базальты составляют незначительную часть лунной коры, и в связи с этим их состав не отражает состав лунной мантии в целом. Поэтому не исключено, что лунная мантия, по крайней мере, в некоторых областях или даже в целом, тождественна по магнезиальности земной мантии.

Глава 6. Морской метеорит Dhofar 287: разнообразие морского вулканизма.

Морской метеорит Dh 287 состоит из двух частей: морского базальта Dh 287А (95%) и реголитовой брекчии Dh 287В (5%). Dh 287А представляет собой оливин-ильменитовый базальт, который по составу похож на LT базальты «Аполлона 12 и 15», но отличается высокими содержаниями Na, K и р.з.э. Брекчия содержит фрагменты пород, стекол и импактных брекчий, находящихся в матрице, состоящей из мономинеральных обломков с небольшим количеством ударного стекла. Основываясь на химии минералов и общем химическом составе пород, можно выделить несколько компонентов Dh 287.

Низкотитанистые (LT) базальты. Породы этого типа преобладают в брекчии и представлены полнокристаллическими породами (класты 6г, 7г1), витрофировыми породами (класт 5г1) и стеклами, что указывает на различную скорость остывания расплава. Кристаллические породы – это ильменитовые базальты, которые содержат плагиоклаз битовнитового состава (An_{81-86}). Оливин не является в них распространенным минералом, за исключением Dh 287А, который также принадлежит этой группе и может быть фрагментом брекчии Dh 287В. LT базальты Dh 287В близки LT базальтам «Аполлона 12 и 15», но более обогащены Na. Лишь два фрагмента стекла не отличаются по содержанию Na от обычных LT базальтов.

Очень низкотитанистые (VLT) базальты. Этот тип менее распространен и представлен преимущественно фрагментами пород (класты #5г2 и #4г). По минералогии такие породы являются анортитовыми базальтами, содержащими плагиоклаз анортитового состава (An_{92-96}) в отличие от LT базальтов Dh 287. По химическому составу они близки VLT базальтам «Луны 24» и «Аполлона 17», но имеют более низкую магнезиальность. Очевидно, эти породы представляют отдельную магматическую группу. Некоторые минеральные фрагменты и стекла по составу связаны с этой группой.

Пикритовый материал является второстепенным, но характерным компонентом брекчии Dh 287В. Он присутствует в виде стеклянных капель и обломков. Никаких структур течения и инородных включений в этих объектах не найдено. По химическому составу они сходны с зелеными стеклами «Аполлона 15» (Delano, 1986), которые имеют вулканическое происхождение и образовались при фонтанирующих извержениях лавы. Следовательно, можно полагать, что извержения такого типа имели место в регионе выброса метеорита Dh 287. Метабазальт (класт #7г2) имеет такой же пикритовый состав. Эта порода с равнозернистой гранобластовой текстурой и уравновешенным составом сла-

гающих минералов, возможно, представляет собой перекристаллизованное пикритовое стекло.

Неизвестная крупнозернистая порода (породы). В популяции мономинеральных фрагментов Dh 287В наблюдаются магнезиальные пижониты ($Wo_{5-20}En_{60-70}$) и богатые Са плагиоклазы (An_{88-96}), которые практически отсутствуют во фрагментах пород. Вероятно, источником богатых Са плагиоклазов могли быть VLT базальты, однако возможно, что и анортиты и магнезиальные пижониты образовались из одной и той же крупнозернистой породы с высокой магнезиальностью и низким содержанием Na.

KREEP группа. Фрагмент монцодиоритового стекла и KREEP стекло ударного плавления представляют неморской фракционированный материал брекчии. KREEP является характерным компонентом западной части видимой стороны Луны, поэтому его присутствие в Dh 287В ограничивает возможный регион выброса метеорита.

Чтобы оценить возможные генетические связи между различными породами метеорита Dh 287 была использована программа METEOMOD (Ariskin *et al.*, 1997), с помощью которой моделировались равновесная и фракционная кристаллизация их расплавов. Программа была специально откалибрована с использованием экспериментальных данных по кристаллизации лунных базальтов. Кристаллизация моделировалась при летучести кислорода, заданной буфером железовюстит и при давлении 1 атм.

Установлено, что в Dh 287 присутствуют 2 типа расплавов (рис. 7): 1) расплавы, насыщенные оливином, которые представлены пикритовыми составами, Dh 287А и LT стеклом с низким содержанием Na, и 2) расплавы, близкие к сонасыщению оливином, пироксеном и

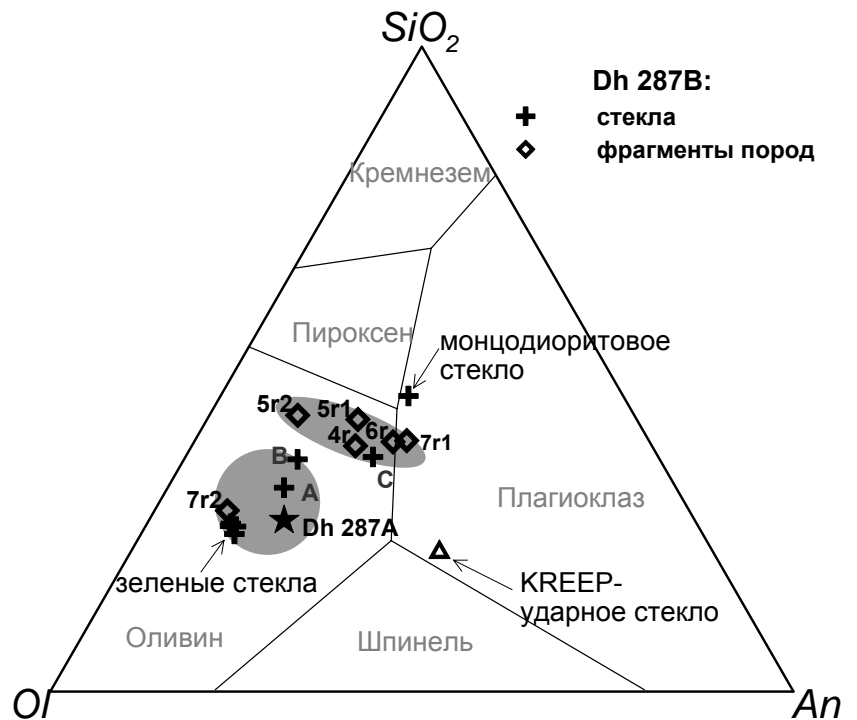


Рис. 7. Нормативные составы (мол.%) пород Dh 287 на диаграмме оливин-анортит-кремнезем.

плаггиоклазом, которые на диаграмме Ol-An-SiO₂ располагаются вдоль оливин-пироксеновой границы, близко к насыщению плаггиоклазом. Можно предположить, что породы второй группы могут быть получены из более примитивных расплавов первой группы при близкповерхностном фракционировании оливина. Считается, что такие процессы ответственны за разнообразие базальтов многих регионов Луны (напр., Paríke, Vaniman, 1978).

Изменение состава расплава при равновесной кристаллизации пикритового расплава брекчии Dh 287В представлено на рис. 8. Последовательность появления фаз и их составы похожи на экспериментальные данные, полученные для зеленых стекол «Аполлон 15» (Grove, Vaniman, 1978). В ходе фракционной кристаллизации пикритового расплава образуются пижонит (Wo₉En₆₁) и плаггиоклаз (An₈₉), когда оливин (Fo₆₂) исчезает из последовательности. Эти результаты предполагают, что источником фрагментов магнезиального пижонита и анортита Dh 287В могла быть пикритовая магма. Фракционная кристаллизация пикритовой магмы также может произвести VLT породы (класты 4r, 5r2), но не VLT стекло (С), богатое Na, и не LT породы, которые имеют слишком высокое содержание Ti и Na. (рис. 8).

Dh 287А представляет собой продукт кристаллизации первичного расплава, так как модельные и реально наблюдаемые в породе ранние фазы имеют практически одинаковый состав, и, следовательно, Dh 287А не является кумулатом. Этот базальт по содержанию нормативного оливина близок пикритовым стеклам (рис. 7), которые, как предполагается, сформировались при частичном плавлении на глубине свыше 400 км (Grove, Lindsley, 1978). Хотя Dh 287А представляет примитивную жидкость, другие LT базальты показывают боль-

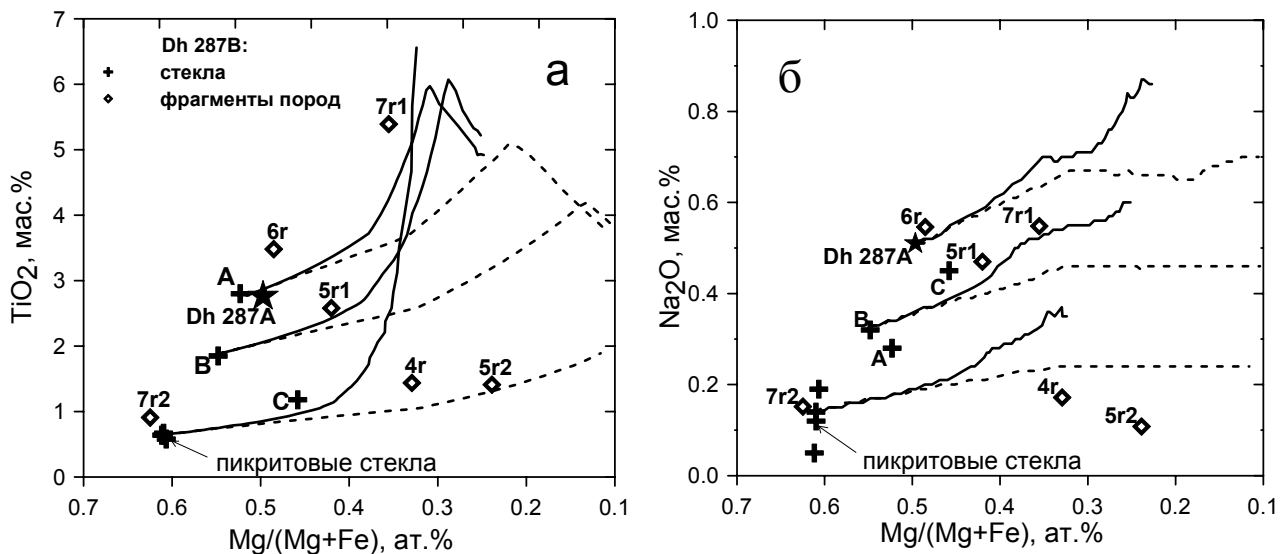


Рис. 8. Изменения магнезиальности и содержания TiO₂ (а) и Na₂O (б) при равновесной (сплошная линия) и фракционной (пунктирная линия) кристаллизации расплавов составов Dh 287А, LT стекла В и пикритового стекла.

шой разброс по содержанию Ti и Na и не могут быть произведены из одной единственной жидкости.

LT стекло с низким содержанием Na (B) сопоставимо по магнезиальности с Dh 287A и, кроме того, однородно, не имеет структур течения и включений. Последовательность появления фаз при равновесной кристаллизации оливин-насыщенных расплавов Dh 287A и LT стекла B практически одинакова. Таким образом, LT стекло B может также представлять состав первичного расплава.

LT базальт (класт 7r1) может быть получен в результате равновесной кристаллизации первичного расплава Dh 287A или LT стекла B (рис. 8). Однако другой LT базальт (класт 6r) имеет слишком высокую магнезиальность и содержание Na, и не может быть получен из этих расплавов. Расчетные составы ранних минералов более магнезиальны, чем наблюдаемые в этой породе, что свидетельствует о том, что она является кумулатом и имеет другой родительский расплав. Витрофировый LT базальт (класт 5r1) может образоваться при магматическом фракционировании первичного расплава Dh 287A или LT стекла B (рис. 8).

Таким образом, все разнообразие пород метеорита Dh 287 невозможно получить с помощью близповерхностного фракционирования единственной родительской магмы. Необходимо допустить существование трех типов родительских расплавов, которые представлены в метеорите пикритовым стеклом, LT стеклом с низким содержанием Na и базальтом Dh 287A. Различия в составе этих возможных родительских расплавов могут объясняться неоднородностью лунной мантии и/или процессами ассимиляции. В последнем случае LT расплав с низким содержанием Na и расплав Dh 287A должны иметь гибридный состав и, возможно, образовались в ходе ассимиляции KREEP материала пикритовой магмой. Петрографически KREEP материал присутствует в Dh 287 (богатый K мезостази́с в Dh 287A и KREEP стекло в Dh 287B), что отражается и в содержаниях редких элементов (высокие содержания K, легких р.з.э.). Это, наряду с Sm-Nd и Rb-Sr изотопными данными (Shih *et al.*, 2002), указывающими на гибридное происхождение базальта Dh 287A, подтверждает модель ассимиляции.

Таким образом, Dh 287 содержит в себе материал нескольких извержений, различающихся по составу, условиям образования и истории остывания.

Заключение.

Исследованы и зарегистрированы новые лунные метеориты из района Дофар (Оман). Дано первое систематическое описание лунных метеоритов коллекции РАН. Среди них присутствуют материковые, морские и смешанные метеориты, представляющие, по крайней мере, 7 независимых падений.

Лунные метеориты представительно характеризуют вещественный состав корового вещества Луны. В этих метеоритах установлены практически все компоненты, известные в образцах, доставленных экспедициями «Аполлон» и аппаратами «Луна», включая такие редкие типы, как монцодиориты, граниты, дуниты, пироксениты, пикритовые стекла и глубинный материал. Оценки среднего состава лунной коры, основанные на числе падений и массах лунных метеоритов, приводят к сходным результатам, что указывает на их достоверность. Более того, эти оценки по содержанию Fe, Ti и Th сопоставимы с последними орбитальными данными, полученными аппаратами Lunar Prospector и Clementina.

Материковая кора Луны определенно должна быть богаче плагиоклазом и беднее несовместимыми элементами, чем считалось ранее, что совместимо с гипотезой океана магмы. Морские районы лунной поверхности в среднем отвечают по составу LT базальтам. Высокотитанистые базальты пользуются, по видимому, очень ограниченным распространением. Популяция смешанных метеоритов, возможно, характеризует состав переходных зон море/материк, особенностью которых могло бы быть присутствие магнезиальных VLT базальтов.

Разнообразие морских базальтов и их родительских расплавов, наблюдаемых в одном метеорите Dh 287, наряду с обогащением легкими р.з.э. многих морских метеоритов, может указывать на значительную роль ассимиляции KREEP компонента магмами морских базальтов.

Геохимические данные о лунных метеоритах подтверждают возможное обогащение лунного вещества труднолетучими и обеднение легколетучими и сидерофильными элементами относительно хондритов.

Полученные оценки равновесных температур шпинель-алюмоэнстатит-плагиоклаз-оливиновых ассоциаций находятся в интервале 580-1150 °С. Для большей части зерен алюмоэнстатита минимальная глубина образования составляет около 20 км и не более 35 км, максимально возможные глубины для существования рассматриваемых парагенезисов определяются стабильностью плагиоклаза и составляют примерно 150-170 км, что соответствует средним зонам лунной коры или верхней мантии. Магнезиальность лунных алюмоэнстатитов и земной мантии совпадают. Это предполагает, что лунная мантия, по

крайней в мере в некоторых областях, не отличается по магнезиальности от земной мантии.

Список работ по теме диссертации

Статьи:

1. **Demidova S.I.**, Nazarov M.A., Anand M., Taylor L.A. A lunar regolith breccia Dhofar 287B: A record of lunar volcanism // Meteorit. Planet. Sci. 2003. V. 38. №4. P. 501-514.
2. Anand M., Taylor L.A., Misra K.C., **Demidova S.I.**, Nazarov M.A. KREEPy lunar meteorite Dhofar 287A: A new lunar mare basalt // Meteorit. Planet. Sci. 2003. V. 38. №4. P. 485–499.
3. Назаров М.А., Бадюков Д.Д., Лоренц К.А., **Демидова С.И.** Поток лунных метеоритов на Землю // Астрономический вестник. 2004. Т. 38. №1. С. 53-62.
4. **Демидова С.И.**, Назаров М.А., Лоренц К.А., Курат Г., Брандштеттер Ф., Нтафлос Т. Химический состав лунных метеоритов и лунной коры // Петрология. 2007. Т. 15. №4. С. 416-437.
5. Назаров М.А., Аранович Л.Я., **Демидова С.И.**, Нтафлос Т., Брандштеттер Ф. Аллюмоэнстатиты лунных метеоритов и глубинные породы Луны // Петрология. 2011. Т. 19. №1. С. 14-26.

Тезисы докладов:

1. Taylor L.A., Nazarov M.A., **Demidova S.I.**, Patchen A. Dhofar 287: A new mare lunar mare basalt from Oman // Meteorit. Planet. Sci. 2001. V. 36. Suppl. P. A204.
2. **Demidova S.I.**, Nazarov M.A., Anand M., Taylor L.A. Clast population of lunar regolith breccia Dhofar 287B // Lunar Planet. Sci. Conf. 33. 2002. #1290.pdf.
3. Nazarov M.A., **Demidova S.I.**, Patchen A., Taylor L.A. Dhofar 301, 302 and 303: Three new lunar highland meteorites from Oman // Lunar Planet. Sci. Conf. 33. 2002. #1293.pdf.
4. **Demidova S.I.**, Nazarov M.A., Kurat G., Brandstätter F., Ntaflos T. Lunar meteorite Dhofar 310: A polymict breccia with deep-seated lunar crustal material // Meteorit. Planet. Sci. 2003. V. 38. Suppl. P. A30.
5. **Demidova S.I.**, Nazarov M.A., Taylor L.A., Patchen A. Dhofar 304, 305, 306 and 307: New lunar highland meteorites from Oman // Lunar Planet. Sci. Conf. 34. 2003. #1285.pdf.
6. Nazarov M.A., **Demidova S.I.**, Taylor L.A. Trace element chemistry of lunar highland meteorites from Oman // Lunar Planet. Sci. Conf. 34. 2003. #1636.pdf.
7. Nazarov M.A., **Demidova S.I.**; Patchen A., Taylor L.A. Dhofar 311, 730 and 731: New lunar meteorites from Oman // Lunar Planet. Sci. Conf. 35. 2004. #1233.pdf.
8. **Demidova S.I.**, Nazarov M.A., Kurat G., Brandstätter F., Ntaflos T. New lunar meteorites from Oman: Dhofar 925, 960 and 961 // Lunar Planet. Sci. Conf. 36 2005. #1607.pdf.
9. Nazarov M.A., **Demidova S.I.**, Brandstätter F., Ntaflos T., Kurat G. Deep-seated crustal material in Dhofar lunar meteorites: Evidence from pyroxene chemistry // Lunar Planet. Sci. Conf. 36. 2005. #1063.pdf.