

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. П.К. ШТЕРНБЕРГА

На правах рукописи
УДК 523.34

Лу Янсяои

**СОВРЕМЕННЫЕ ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СОСТАВА ЛУННОЙ
ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность - 01.03.02 астрофизика и звездная астрономия

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва 2012

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор
Шевченко Владислав Владимирович
(Государственный астрономический институт
имени П.К. Штернберга, заведующий Отделом
исследований Луны и планет)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Митрофанов Игорь Георгиевич
(Институт космических исследований РАН,
заведующий Лабораторией космической
гамма спектроскопии)

доктор физико-математических наук
Рускол Евгения Леонидовна
(Институт физики Земли РАН, главный
научный сотрудник)

Ведущая организация:

Институт астрономии РАН

Защита состоится “10” мая 2012 г. в 14:00 часов на заседании Диссертационного совета Д501.000.86 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Университетский проспект, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ (Москва, Университетский проспект, 13).

Автореферат разослан

“ 05 ” апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д501.000.86
доктор физ.-мат. наук

Алексеев С.О.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Проблемы освоения Солнечной системы в настоящее время выдвигаются на первый план в процессе развития космических исследований дальнего космоса. В последние годы происходит естественный процесс совершенствования космической техники. Также устаревают методы и подходы создания и эксплуатирования автоматических межпланетных станций, поскольку расширяется круг задач, пригодных для успешного решения с помощью космической робототехники. Совершенствование автоматизированных комплексов позволяет выполнять все более сложные операции при дистанционных и контактных исследованиях. Большие успехи этого направления, достигаемые при ограниченном ресурсном обеспечении, порождают серьезные доводы в пользу исключительного применения автоматических космических средств при полетах в Солнечной системе.

Существование местных внеземных ресурсов может значительно облегчить развитие деятельности на некоторых небесных телах Солнечной системы (так, например, наличие запасов водяного льда в «холодных ловушках» в лунных приполярных кратерах могло бы существенно упростить развертывание и деятельность первых лунных обитаемых форпостов). В этой связи детальный анализ современных данных о наличии потенциальных ресурсов Луны позволит определить верное направление и темпы развития космической деятельности.

Новым фактором в развитии международных космических исследований является расширение числа мировых держав, показавших свою способность на самостоятельную и кооперативную деятельность не только в ближнем, но также и в дальнем космосе. Объединенная Европа, Китай, Япония и Индия уже осуществили практические шаги по реализации проектов исследования ближайших и удаленных от Земли космических объектов. Космические агентства этих стран уже декларировали осуществление первых шагов к освоению планетных тел в недалеком будущем. Эти планы, прежде всего, рассматривают Луну, предполагая перспективную организацию долгосрочного

или постоянного пребывания человека на поверхности земного спутника уже в ближайшие 15 – 20 лет.

На современном этапе практически одновременно ряд стран, активно осуществляющих различные проекты в космосе, выступили с инициативами возобновления в будущем пилотируемых полетов к Луне вплоть до создания долговременной обитаемой лунной базы.

Выбор места для детальных исследований на поверхности Луны автоматическими аппаратами и в дальнейшем пилотируемыми экспедициями предварительно основывается на результатах дистанционного анализа физических свойств и химического состава поверхности.

В то же время, получение данные с орбитальных или пролетных космических аппаратов (КА) помогает построить более совершенные модели эволюции поверхности Луны, что относится к фундаментальным направлениям в области планетных наук.

Цель работы

Основной целью данной диссертационной работы является применение методов планетной астрофизики для анализа свойств лунной поверхности с использованием результатов, полученных с борта космических аппаратов. В результате космических миссий, осуществленных разными странами в последнее время, появилась возможность провести научную обработку и интерпретацию результатов, полученных КА «Clementine», «Lunar Prospector» и «Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)», запущенных к Луне НАСА США, а также первых лунных КА, созданных в КНР, «Chang'E – 1» и «Chang'E – 2». Химический состав лунных пород стал детально известен после доставки на Землю образцов из отдельных районов лунной поверхности. Но чтобы представить характеристики не только отдельных мест, но и глобальные данные, необходимо применить дистанционные методы исследований. На ранних стадиях работы было установлено, что существует взаимосвязь между содержанием основных химических элементов, таких, как железо (Fe), и топографическими особенностями изучаемых районов. Сопоставление этих характеристик с привлечением данных об экспозиционном возрасте поверхностного вещества позволяет

установить последовательность формирования лавовых потоков в лунных морях видимого (Океан Бурь) и обратного (Море Москвы) полушарий.

Научная новизна работы

Современные дистанционные исследования основываются на данных, полученных с помощью пролетных или орбитальных аппаратов. В качестве основных методов на современном этапе изучения Луны применяются оптические (спектральные и поляризационные) методы, разработанные ранее в процессе наземных телескопических наблюдений и модифицированные применительно к наблюдениям с окололунной орбиты.

Химические элементы Si, O, Fe, Ti, Al, Ca и Mg являются главными элементами в составе лунных пород. Часто элементное содержание пересчитывают в содержание соответствующих окислов, например, SiO₂, FeO, TiO₂, Al₂O₃, CaO и MgO. Информация о содержании и распределении этих и других элементов по лунной поверхности была получена методами дистанционной спектроскопии, оптической, нейтронной, гамма и рентгеновской съемкам. Пространственное разрешение имеющихся данных разное, но, тем не менее, их сравнение и совместное использование вполне возможно. Впервые использованы данные дистанционных измерений для построения структуры лавовых потоков в ряде мест, представляющих особый научный интерес, на видимом и обратном полушариях Луны.

Обработка данных, переданных с борта КА «Clementine» и «Lunar Prospector», позволила получить результаты глобальных исследований химического состава поверхности Луны. Эти результаты были получены с помощью бортовых гамма-спектрометра и спектрометра альфа-частиц. В частности, более точно было определено содержание железа (Fe) и титана (Ti) в застывшей лаве вулканических расплавов. Их концентрация оказалась различной для разных по морфологии участков поверхности. На основе этих данных в диссертации впервые были найдены участки с высоким содержанием железа (более 25 вес.% FeO) в Океане Бурь и дана интерпретация этих особенностей.

Впервые проведен сравнительный анализ распределения железа в поверхностном слое базальтов Моря Москвы и морфологических характеристик района, полученных с борта КА «Chang'E-1».

Впервые проведено исследование аномально повышенного содержания железа в потоках склоновых осыпях в ряде кратеров разного возраста. При этом впервые проведено изучение этих образований с использованием крупномасштабных снимков, полученных КА «Chang'E-2», и выполнено сопоставление с данными КА «LRO».

Впервые выполнена корреляция распределения высот и повышенного содержания железа в области Океана Бурь и в области Моря Москвы. Определена зависимость экспозиционного возраста лавовых образований и распределения повышенного содержания железа, на основании чего построена схема генезиса морских образований с различным содержанием обогащенных железом пород в лавовых покрытиях морей видимого и обратного полушарий Луны (Океан Бурь и Море Москвы).

В связи с планируемой миссией «Chang'E-3» впервые сделана оценка различных возможных мест для прямых исследований лунного покровного вещества с использованием передвижной автоматической лаборатории.

Научная и практическая ценность работы

Дистанционными и прямыми методами исследования Луны выяснено, что лунная поверхность покрыта мелкозернистой слабосвязанной шлакообразной породой, получившей название «реголит». Реголит образуется в результате постоянного воздействия на покровное вещество космических лучей, солнечной радиации, микрометеоритов и метеоритов различного размера. Подобная переработка поверхностного слоя Луны приводит к формированию реголита толщиной от нескольких сантиметров до десятков метров, в зависимости от морфологических характеристик того или иного района. Прямыми методами на лунной поверхности исследованы девять отдельных районов, представительность которых различается в зависимости от площади сбора образцов. Шесть мест посадок КК «Apollo» характеризуются большим охватом и разнообразием образцов. Три места посадок КА «Луна» характеризуют ограниченные участки сбора тонкой фракции грунта и отдельных мелких фрагментов пород.

Основная информация об элементном химическом составе поверхностного слоя Луны получена дистанционными методами планетной астрофизики. Дистанционные методы планетной астрофизики базируются на анализе распределения спектрального альbedo отражающей поверхности. Как физическое понятие альbedo употребляется для описания отражательных свойств вещества в видимой части спектра. Основным параметром, определяющим альbedo пород, является их химический состав. Поэтому альbedo, в особенности, спектральное альbedo, используется в случае дистанционного определения минералогического состава пород. При использовании орбитальной съемки лунной поверхности в ряде случаев применялись методы регистрации и анализа потока альфа- и гамма-частиц, по спектральному распределению которых также определяется элементный состав покровного вещества. В данном исследовании разработаны и применены приемы совместного использования различных дистанционных методов для определения характеристик лунной поверхности.

Анализ среднего элементного состава поверхностного слоя лунного грунта показывает, что основными характерными особенностями химического состава лунных пород является содержание железа, титана, алюминия и магния. Основным люминофором является железо и его соединения, главным образом окислы. Корреляционные зависимости железа и других элементов часто служат вторичными признаками для определения химического и минералогического состава пород, имеющих различное альbedo. В данной работе показано, что содержание железа в лунных породах может служить надежным указанием на генезис исследуемых объектов лунной поверхности. Кроме того, по материалам съемки с КА «Clementine» были получены непосредственные данные о наличии корреляции между спектральным альbedo поверхностных пород и содержанием в них окислов железа для ряда районов поверхности, представляющих непосредственный практический интерес для перспективных космических миссий.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Проведен детальный анализ зависимости содержания железа от абсолютного возраста пород, для чего составлен подробный каталог

образцов различных пород, доставленных на Землю. Полученная зависимость представляет собой характеристику вулканических морских базальтовых лав, выплавление которых из недр Луны (абсолютный возраст) относится к разным эпохам эволюции лунного шара и его поверхности. В результате сделано заключение, что эти обогащенные железом расплавы вышли на поверхность из наиболее глубоких горизонтов лунных недр, где содержание железа в базальтовой лаве превышает 20 – 25 вес. %.

2. С использованием спектральной съемки ряда кратеров, проведенной с борта КА «Clementine», была сделана дистанционная оценка содержания железа (пироксенов) в поверхностном слое исследуемого материала. Для расчетов был использован метод, разработанный Lucey et al. по определению дистанционного анализа состава и зрелости поверхностных пород Луны. Основным выводом, следующий из этих данных, заключается в том, что содержание железа в горизонтах пород, лежащих ниже «фоновой поверхности», т.е. ниже верхних слоев реголита на глубине до 400 м, заметно увеличивается. В процессе интерпретации данных использованы крупномасштабные снимки КА «LRO» и «Chang'E-2».
3. Изучен материал осыпей на внутренних склонах кратеров, который отличается высокой степенью незрелости. Это обстоятельство предварительно можно интерпретировать как указание на постоянно происходящий процесс склонового перемещения вещества, приводящего к обнажению более свежего (незрелого) грунта. Оценочные значения экспозиционного возраста поверхностного слоя грунта в среднем составляют менее 100 лет.
4. На основании полученных результатов сопоставления абсолютного возраста базальтовых пород и содержания железа в этих породах с данными по трехмерным моделям рельефа была построена обобщенная схема глубинных источников базальтовых лав разного содержания.
5. С использованием результатов дистанционных исследований был выполнен предварительный выбор района работы лунохода по программе «Chang'E-3» в Заливе Радуги. Показано, что Залив Радуги и окружающие его горы являются одними из интересных деталей лунной

поверхности. Область Залива Радуги представляет область, богатую свидетельствами исторической эволюции поверхности Луны. Вместе с тем эта местность имеет сравнительно сглаженный рельеф (средняя величина склонов ~ 2 градуса), что наилучшим образом подходит для посадки последующего движения лунохода в процессе сбора образцов. Выбранная область представляет интерес для перспективной китайской лунной программы.

Личный вклад автора

Автором проведена систематизация и обработка материалов, полученных с борта КА «Clementine», «Lunar Prospector», «LRO», «Chang'E-1» и «Chang'E-2», по которым построены карты распределения железа в поверхностных породах избранных районов, проведены вычисления для избранных кратеров и выполнено сопоставление с топографией данных образований. Автором проведена интерпретация полученных результатов, на основании которой построены обобщенные схемы зависимости распределения железосодержащих пород от топографии образований и глубинных источников базальтовых лав разного содержания. Проведен выбор места для исследований на поверхности Луны согласно перспективным программам КНР.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

1. 46-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии, Институт Вернадского (ГЕОХИ) - Университет Брауна (США), Москва, 2-3 октября 2007 г.
2. Генеральная Ассамблея Европейского Геофизического Союза, Вена, апрель 2008.
3. 7-ая Всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, Москва, 16-20 ноября 2009 г.

4. 50-й Микросимпозиум по сравнительной планетологии, Институт Вернадского (ГЕОХИ) – Университет Брауна (США), Москва, 12-14 октября 2009г.
5. Геофизика на поверхности Луны, Аризона, США, 21-22 января 2010.
6. 41-я Лунно-планетная конференция, Хьюстон, США, 1-5 марта 2010 г.
7. Международный симпозиум по наукам о Луне (ISLS 2010), Макао, КНР, 25-26 марта 2010г.
8. 1-й московский симпозиум по солнечной системе (1М-S3), ИКИ РАН, Москва, 11-15 октября 2010г.
9. 42-я Лунно-планетная конференция, Хьюстон, США, 7-11 марта 2011 г.
10. Второй московский симпозиум по солнечной системе(2М-S3), ИКИ РАН, Москва, 10-14 октября 2011г.
11. 43-я Лунно-планетная конференция, Хьюстон, США, 19-23 марта 2012 г.
12. Европейский лунный симпозиум, Берлин, 19-20 апреля 2012 г.

Список публикаций по теме диссертации:

1. Lu Yangxiaoyi. Iron abundances in lunar regolith and a model of evolution of the lunar surface. **New advances in lunar exploration**, Макао, 2010, p. 215-219.
2. Шевченко В. В., П. К. Пине, С. Д. Шеврель, И. Даду, Я. Лу, Т. П. Скобелева, О. И. Кварацхелия, К. Роземберг. Современные склоновые процессы на Луне, **Астрономический вестник**, т. 46, №. 1, 2012, с. 3–20.
3. Лу Я., Шевченко В.В. Повышенное содержание железа в склоновых осыпях некоторых лунных кратеров, **Астрономический вестник**, т. 46, № 4, 2012 (принято в печать).
4. Lu Yangxiaoyi, V. Shevchenko. “The Current Avalanche Deposits in Lunar Craters”, **Advances in Space Research**, 2012 (in press).
5. Lu, Y. "Correlations Between Iron Abundances and Lunar Surface Features: Crater Kepler Area", 41st Lunar and Planetary Science Conference, held March 1-5, 2010, The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1533, p.1258.
6. Lu, Y., V. Shevchenko. "Correlations between iron distribution and morphology of crater Kepler area", **Geophysical Research Abstracts**, Vol. 10,

EGU2008-A-05136, 2008 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-05136 EGU General Assembly 2008.

7. Lu, Y. "Research of Iron Abundances in Lunar Regolith and a Model of Evolution of the Lunar Surface", Ground-Based Geophysics on the Moon, January 21-22, 2010, Tempe, Arizona. LPI Contribution No. 1530, p.3007.
8. V.V. Shevchenko, P.C.Pinet, S.Chevrel, Y.Daydou, T.P.Skobeleva, Lu Yangxiaoyi, O.I.Kvaratskhelia, C.Rosemberg. "The current avalanche deposits in lunar crater Reiner: LRO data", 42nd Lunar and Planetary Science Conference, held March 7-11, 2011, The Woodlands, Texas. Abstract #1161.
9. Lu, Y., V.V.Shevchenko. "Dry Debris Flow on the Moon: Chang'E-2 Data", 42nd Lunar and Planetary Science Conference, held March 7-11, 2011, The Woodlands, Texas. Abstract # 1254.
10. Lu Yangxiaoyi. "Current events on the moon: LROC and Chang'E-2 data.", 43nd Lunar and Planetary Science Conference, held March 19-23, 2012, The Woodlands, Texas. Abstract #1207.
11. Lu Yangxiaoyi. "Correlations between iron distribution and morphological evolution of Mare Moscoviense.", Европейский лунный симпозиум, Берлин, 19-20 апреля 2012 г.

Структура и содержание диссертации

Объем представленной работы составляет _____ страницу, включая _____ таблиц, _____ рисунков и список литературы из _____ наименований. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели исследования, описываемого в последующих главах, и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируется современный этап исследований Луны орбитальными аппаратами. Выделена начальная стадия современных лунных исследований, в процессе которой были проведены исследования с помощью КА «Clementine» и «Lunar Prospector» (НАСА США). Следующая стадия исследований отмечена запуском лунных спутников нового поколения «SMART-1» (ЕКА), «Chandrayaan-1» (Индия), «Kaguya» (Япония), «Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)» (НАСА США). Особо выделена программа

лунных исследований, осуществляемая КНР. Рассмотрены результаты исследований, выполненных КА «Chang'E – 1» и «Chang'E – 2». Детально описаны перспективные проекты - «Chang'E – 3» и другие лунные миссии.

Во второй главе приводится аналитический обзор дистанционных орбитальных методов исследования Луны с помощью астрофизических методов. Основными методами названы гамма-спектрометрические, оптические (спектральные) и спектрополяризационные исследования. Показано, что с помощью этих методов можно с высокой надежностью определять зрелость грунтов и наличие обогащенных железом пород.

В третьей главе даны результаты определения содержания обогащенных железом пород в поверхностном слое отдельных лунных образований. Принципиально важные результаты получены при исследовании участков в Океане Бурь, которые отличаются аномально высоким содержанием железа. Существенное значение имеют результаты сопоставления морфологических характеристик и железосодержащих поверхностных пород в области Моря Москвы. Дополняют эти результаты исследования аномалий повышенного содержания железа в склоновых осыпях ряда лунных кратеров, выполненные по крупномасштабным снимкам, полученным КА «LRO» и «Chang'E – 2». Эти данные показывают распределение аномальных грунтов по глубине. Показано, что в исследованных кратерах грунты осей, обогащенные железом, имеют необычно малый для Луны экспозиционный возраст, не превышающий нескольких десятков лет.

Четвертая глава посвящена интерпретации основных полученных в работе результатов. Показано наличие корреляции возраста формирования морских образований и содержания обогащенных железом пород в лавовых покрытиях морей видимого и обратного полушарий Луны. Эта закономерность прослеживается в отдельных районах Океана Бурь и Моря Москвы. Также обнаруживается зависимость экспозиционного возраста и распределения пород с повышенным содержанием железа. Построены схемы генезиса железосодержащих пород в лунных образованиях планетарного и локального масштабов. На основании полученных результатов сделаны оценки районов, наиболее пригодных для посадки и работы автоматических аппаратов по программе «Chang'E – 3».

В заключении приведены результаты, выносимые на защиту.

Содержание работы по главам

Глава I. Современный этап исследований Луны орбитальными аппаратами

Химический состав лунных пород стал детально известен после доставки на Землю образцов из отдельных районов лунной поверхности. Но чтобы представить характеристики не только отдельных мест, но и глобальные данные, необходимо применить дистанционные спектральные методы.

Химические элементы Si, O, Fe, Ti, Al, Ca и Mg являются основными элементами в составе лунных пород. Часто элементное содержание пересчитывают в содержание соответствующих окислов SiO₂, FeO, TiO₂, Al₂O₃, CaO и MgO. Информация о содержании и распределении этих и других элементов по лунной поверхности была получена методами дистанционной спектроскопии, оптической, нейтронной, гамма и рентгеновской съемкам. Пространственное разрешение имеющихся данных разное, но, тем не менее, их сравнение и совместное использование вполне возможно (В.В.Шевченко, 1980).

Обработка данных, переданных с борта КА «Lunar Prospector», позволила получить результаты глобальных исследований химического состава поверхности Луны. Эти результаты были получены с помощью бортовых гамма-спектрометра и спектрометра альфа-частиц. В частности, более точно удалось определить содержание железа (Fe) и титана (Ti) в застывшей лаве вулканических расплавов. Их концентрация оказалась различной для разных по морфологии участков поверхности.

В рамках космических миссий «SELENE (Kaguya)», «Chang'E-1» и «Chandrayaan-1» стало возможным получить трехмерную карту поверхности Луны, провести изучение химического и минералогического состава поверхностных пород. Кроме этого при помощи специальных детекторов космические зонды проводили поиски на Луне таких тяжелых элементов как радон, уран и торий.

Топография Луны, которая получена с помощью лазерного высотомера, передает важную информацию о внутренней структуре и эволюции Луны. Изучение топографии Луны является одной из главных научных целей

орбитальных КА. С помощью лазерного высотомера, установленного на борту КА «*Chang'E-1*», была получена цифровая модель рельефа всей поверхности Луны (*CLTM-s01*) с пространственным разрешением ~ 2 км (Рис.1). Используя данные лунной топографической модели, можно определить абсолютные высоты поверхности в отдельных точках с высокой точностью.

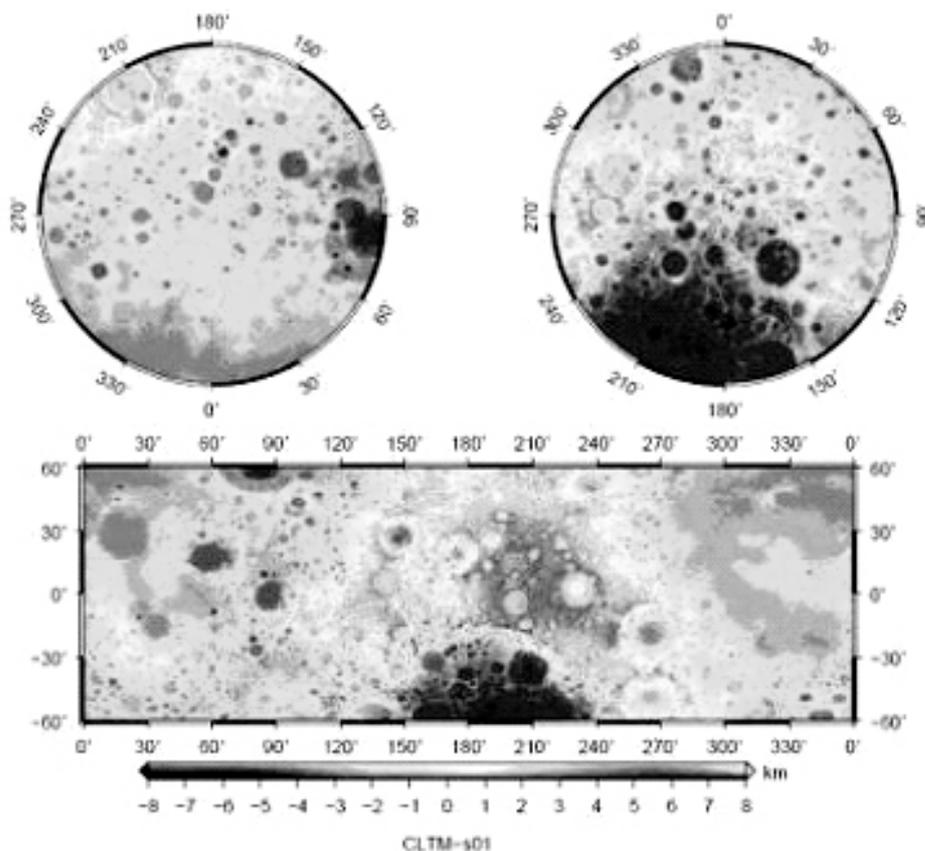


Рис.1

Например, местный радиус Луны в различных точках составляет $\sim 1737,013$ м, $1737,646$ м, $1735,843$ м. Наибольшая глубина впадины согласно этим измерениям составляет - $9,23$ км, в точке с координатами $211.375^{\circ}E$, $61.375^{\circ}S$ (бассейн Южный полюс – Эйткен). Наибольшая высота горной цепи $9,84$ км в точке с координатами $201.375^{\circ}E$, $5.375^{\circ}S$ (кратер Королёв) (Huang, Ping et al., 2010).

Полёт КА «*Chang'E-2*» впервые для китайской лунной программы проходил напрямую по траектории сближения с Луной без промежуточного старта с околоземной орбиты (Ouyang Ziyuan, 2005). Аппарат является вариантом КА

«Chang'E-1», который оснастили новыми лазерным альтиметром и камерой высокого разрешения. В задачу «Chang'E-2» входило изучение условий и выбор подходящего места для посадки лунного аппарата «Chang'E-3» в 2013 году. «Chang'E-3» по программе полета произведет следующие исследования (исследование геологического строения Луны и химических свойств поверхности Луны.):

1. За время нахождения на поверхности Луны в период движения за 90 дней в районе движения «Chang'E-3» на протяжении около 5 км собирает и анализирует грунт и передает результаты анализов непосредственно на Землю.
2. Впервые должен измерить глубину грунта (от 1 до ~30 м.) и строение породы (от 1 до ~3 км) с помощью радиолокатора.
3. Провести измерение расстояния между Землей и Луной в точке посадки.
4. Впервые провести оптические наблюдения с Луны для исследования систем экзопланет, астросейсмологии и активных ядер галактик.

Глава II. Дистанционные орбитальные исследования Луны с помощью астрофизических методов

Содержание железа в реголите можно рассматривать как космогонический показатель эволюции Луны. На поверхности Луны породы с преобладанием железа (базальты) сконцентрированы в лунных морях (их площадь составляет около 17% поверхности Луны). Содержание железа на видимой стороне в среднем больше, чем в поверхностных породах обратной стороны Луны. Основой изучения лунной поверхности и состава грунта является изучение оптических характеристик Луны по спектральным данным, а также нейтронной, гамма и рентгеновской спектроскопии.

Некоторые элементы лунной поверхности (например: торий, уран) сами по себе радиоактивны и испускают γ -излучение. Другие химические элементы излучают энергию в виде гамма-лучей под воздействием космических лучей.

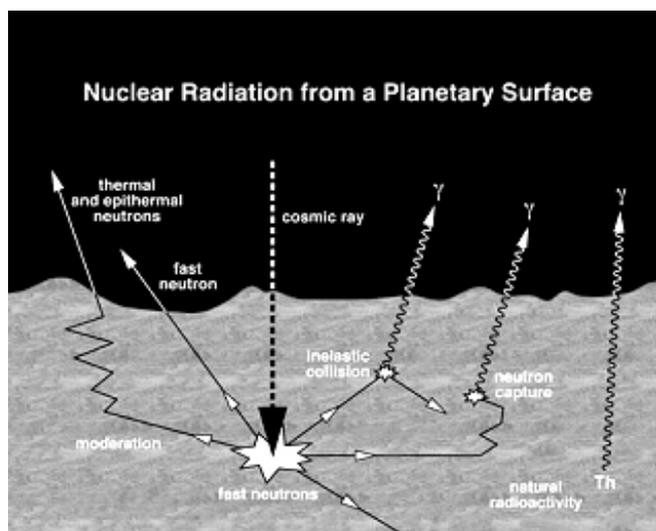


Рис. 2

Различные элементы имеют γ -излучения определенной энергии. Если орбитальный гамма-спектрометр сможет обнаружить эти γ -излучения определенной энергии, то возможно установить содержание этих элементов в поверхностных породах Луны (рис. 2).

Для проведения детального анализа зависимости содержания железа от абсолютного возраста пород нами был составлен подробный каталог образцов различных пород, доставленных на Землю. После обработки данных получена обобщенная зависимость содержания железа от возраста пород, представленная на рис. 3.

Полученная зависимость представляет собой характеристику вулканических морских базальтовых лав, выплавление которых из недр Луны (абсолютный возраст) относится к разным эпохам эволюции лунного шара и его поверхности. Из графика на рис. 3 следует, что базальтовые лавы, вышедшие на поверхность в более поздний период, наиболее обогащены железом. В то же время ранние расплавы базальтов имеют относительно низкое содержание железа.

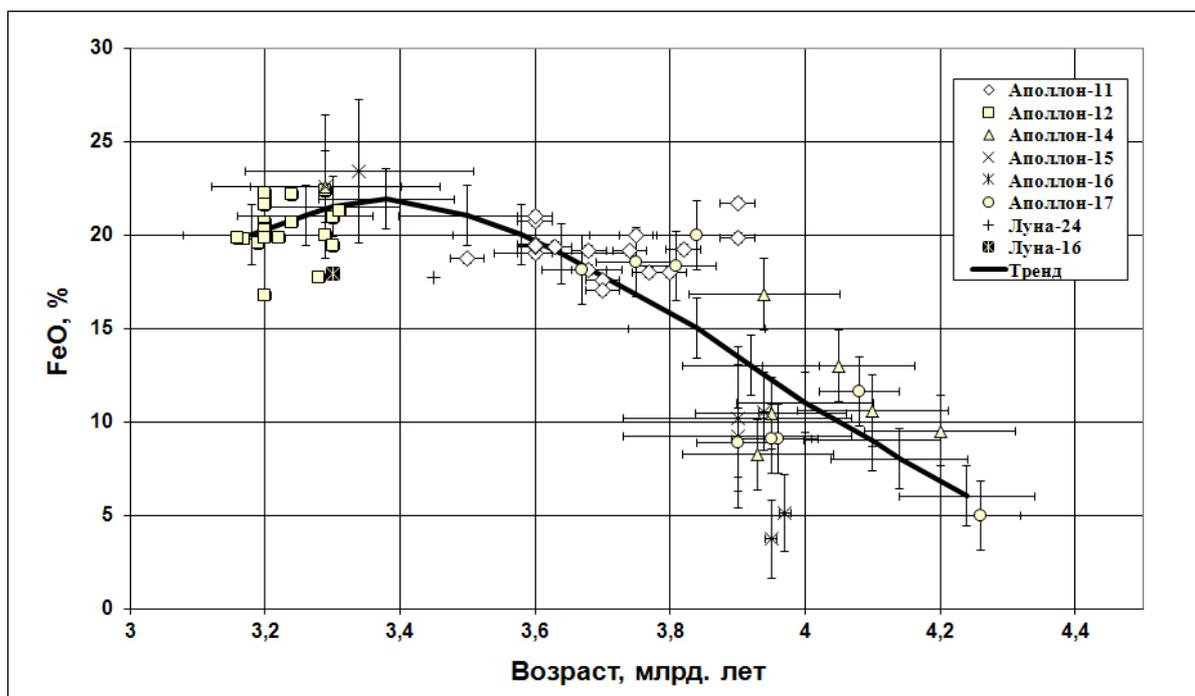


Рис.3.

С тем, чтобы определить содержание железа в произвольной области Луны оптическим спектральным способом, следует использовать метод Lucey (Lucey et al., 1998). Согласно этому методу образцы пород с близким содержанием железа, но различной степенью зрелости, образуют веерные последовательности, приблизительно ориентированные в направлении некоторой особой точки диаграммы (точка «сверхзрелости»), причем расстояние от этой точки характеризует степень зрелости образца, а угол наклона соответствующей прямой – содержание железа. Таким образом, следует перейти на плоскости $A(0,75 \text{ мкм})$, $C(0,95/0,75 \text{ мкм})$ к новой системе полярных координат с центром в точке «сверхзрелости». В этом случае полярный угол оказывается связанным с содержанием железа, а радиальная координата - со зрелостью образцов грунта. Аналогичный подход для «разделения» влияния на альбедо $A(0,750 \text{ мкм})$ и показатель цвета $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$ степени зрелости реголита и содержания в нем двуокиси титана был предложен позднее другими авторами. Для вычисления распределение FeO , TiO_2 и так называемого параметра оптической зрелости OMAT на лунной поверхности использовались данные КА «Clementine». Диаграммы $A(0,750 \text{ мкм}) - C(0,950/0,750 \text{ мкм})$ и $A(0,750 \text{ мкм}) - C(0,750/0,415 \text{ мкм})$ строились с использованием измерений образцов, доставленных экспедициями «Apollo», и оптических данных КА «Clementine» с высоким

пространственным разрешением (100 м/пк). С помощью диаграмм были найдены эмпирические формулы, позволяющие определять состав и оценивать оптическую зрелость по нелинейным комбинациям альбедо при длинах волн 0,950, 0,750 и 0,415 мкм:

$$FeO[\%] = -17.43 \left\{ \arctg \left[\frac{A(0.950) / A(0.750) - y}{A(0.750) - x} \right] \right\} - 7.56$$

$$TiO_2[\%] = 3.71 \left\{ \arctg \left[\frac{A(0.415) / A(0.750) - Z}{A(0.750)} \right] \right\}^{5.98}$$

где $A(\lambda)$ альбедо (в %) при данной длине волны λ , $x = 0,08$, $y = 1,19$ и $z = 0,42$. Формула для вычисления оптической зрелости ОМАТ с помощью диаграммы $A(0,750 \text{ мкм}) - C(0,950/0,750 \text{ мкм})$ имеет вид:

$$OMAT = \sqrt{(A(0.750 - x)^2 + \left(\frac{A(0.950)}{A(0.750)} - y\right)^2}$$

Параметр ОМАТ коррелирует с обычной степенью зрелости лунного реголита I_s/FeO , хотя эта связь не такая тесная, как хотелось бы. Любопытно отметить, что параметры ОМАТ, найденные по паре $A(0,750 \text{ мкм})$, $C(0,950/0,750 \text{ мкм})$ и паре $A(0,750 \text{ мкм})$, $C(0,415/0,750 \text{ мкм})$, совершенно не совпадают друг с другом. Сам Lucey избегает комментировать это и предлагает использовать только ОМАТ, определенный по диаграмме $A(0,750 \text{ мкм})$, - $C(0,950/0,750 \text{ мкм})$. Здесь также уместно добавить, что теоретическое моделирование диаграмм $A(0,750 \text{ мкм})$, - $C(0,950/0,750 \text{ мкм})$ и $A(0,750 \text{ мкм})$ - $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$ и лабораторный эксперимент, показывают, что, на самом деле, никаких точек «сверхзрелости» на этих диаграммах нет, но есть область, где приближенно сходятся оси, вдоль которых изменяется зрелость при приблизительно одинаковом содержании железа (или титана). Таким образом, способ Lucey является методом, позволяющим оценивать состав лунной поверхности только в первом приближении.

Зрелость лунного грунта является важнейшей характеристикой покровного вещества Луны. Степень переработки реголита необходимо

учитывать при дистанционных определениях химического и минералогического состава поверхности. Однако, возможности прямого определения зрелости лунного реголита ограничены лабораторными исследованиями тонкой фракции и микрочастиц доставленных на Землю образцов. В этих условиях резко возрастает актуальность разработки методов дистанционного определения степени зрелости лунного грунта. Предложенный метод использования спектрополяризационных данных для количественной оценки степени зрелости покровного вещества выгодно отличается тем, что полученный индекс зрелости определяется только структурными характеристиками отражающего слоя и полностью свободен от влияния химического и минералогического состава поверхностных пород. Опорный каталог спектрополяриметрических индексов содержит значения, относящиеся к 92 объектам видимого полушария Луны, и включает широкий набор образований с различной степенью зрелости покровного вещества. Были получены корреляционные зависимости с другими индексами зрелости, определяемыми как лабораторными методами, так и дистанционно, а также временная шкала, представляющая соответствие спектрополяризационного индекса зрелости и экспозиционного возраста грунта (В.В.Шевченко, 2003).

Глава III. Содержание железосодержащих пород в поверхностном слое отдельных лунных образований

После кремния и кислорода железо является наиболее распространенным элементом в образцах лунных пород. Например, в образцах, доставленных КК «Apollo-11», его содержание меняется в пределах, от 11,8 до 15,6%, при среднем значении 14,3%. Большая часть железа входит в состав пироксена и ильменита; основным фактором, определяющим содержание железа в породе, является количество ильменита.

Нами были исследованы распределения железа для нескольких характерных районов Луны. На рис. 4 показаны карты распределения железа, построенные нами по данным измерений гамма-спектрометра, установленного на борту КА «Lunar Prospector». На картах показано распределение железа в районе древнего кратера Гримальди на границе Океана Бурь и материка. Также даны

распределения для ударных и сравнительно молодых кратеров Коперник, Кеплер и Прокл.

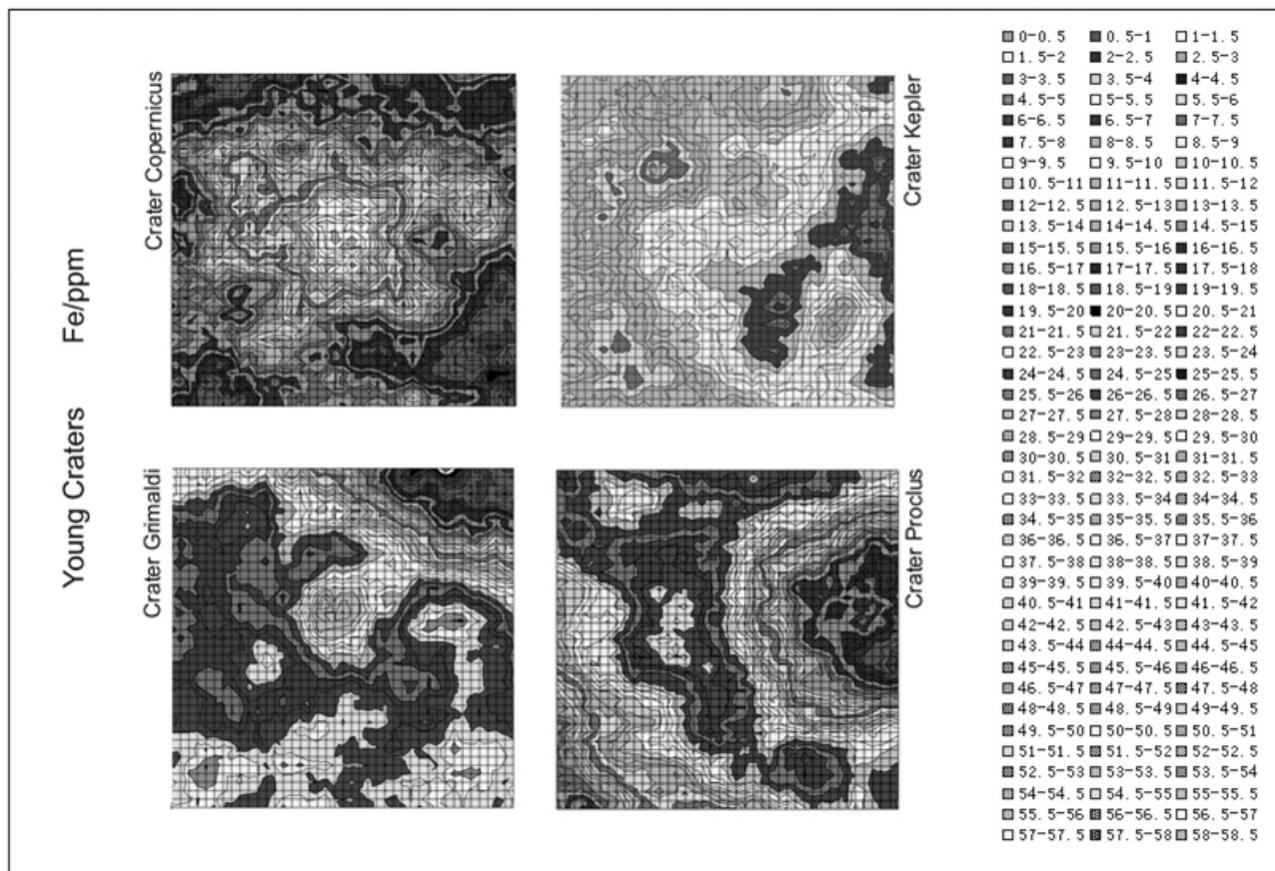


Рис. 4

Особый интерес представляет структура и эволюция морских образований на обратной стороне Луны. Море Москвы — одно из двух морей обратного полушария. Оно расположено во внутреннем кольце большого Московского бассейна ударного происхождения. По распространенности кратеров различного диаметра Московский бассейн подобен району Моря Нектара, из этого делается вывод, что удар, образовавший бассейн, произошел в нектарианский период. От удара возник кратер, включающий Море Москвы и соответствующий среднему кольцу Московского бассейна диаметром 430 км. Вулканическая деятельность, сопровождавшаяся появлением лавы, заполнившей Море Москвы, происходила в позднеимбрийский период. Тектонические разломы прилегающего кратера Комаров, возможно, показывают, что примерно такие же разломы существуют под базальтовыми лавами Моря Москвы. Базальтовые лавы Моря Москвы подобны морским

базальтам видимой с Земли стороны Луны. На рис. 5 показана составленная нами по гамма-спектрометрическим данным КА «Lunar Prospector» карта распространения железа (FeO) в базальтах Моря Москвы. Характерной особенностью является сосредоточение лав, обогащенных железом в центральной части моря.

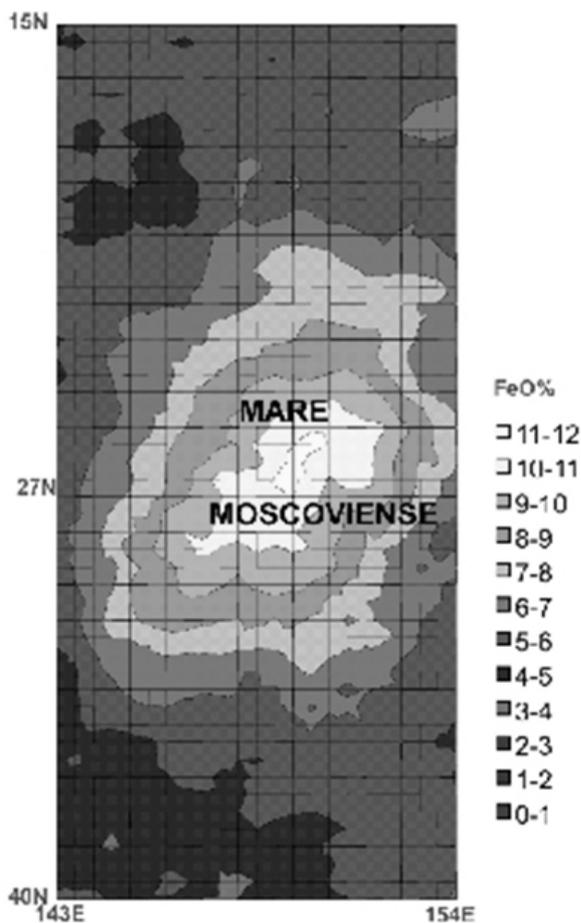


Рис. 5

Появление крупномасштабных съемок лунной поверхности с борта КА «LRO» и «Chang'E – 2», имеющих высокое разрешение, позволяет провести анализ распределения пород, обогащенных железом, внутри отдельных кратеров. Обнаружение склоновых осыпей, которые в ряде случаев являются своеобразными обнажениями подповерхностных слоев лунных пород, привело к ряду интересных выводов.

В работе рассматриваются типичные примеры подобных образований. При исследовании свежих обнажений в кратере Рейнер существенной особенностью оказывается содержание железа (или FeO) в поверхностном

материале, образующим своеобразные потоки мелкодисперсной фракции вдоль склонов внутренних стенок кратера. На рис. 6 показано Статистическое распределение участков поверхности кратера Рейнер и окружающей местности, различающихся по зрелости грунта (параметр ОМАТ) и содержанию Fe (вес. %). Значение углового параметра Θ , данное в радианах, определяет оптическую идентификацию содержания Fe в покровном веществе. Выделенные на диаграмме области относятся к склоновым потокам внутри кратера Рейнер. Из диаграммы на рис. 6 следует, что с уменьшением зрелости покровного вещества (параметр ОМАТ увеличивается) содержание железа возрастает до 16,5 – 17,0 %. Поскольку речь идет о материале нижележащих слоев, можно сделать вывод, что увеличение содержания железа объясняется свойствами подповерхностного вещества, вовлеченного в склоновые процессы.

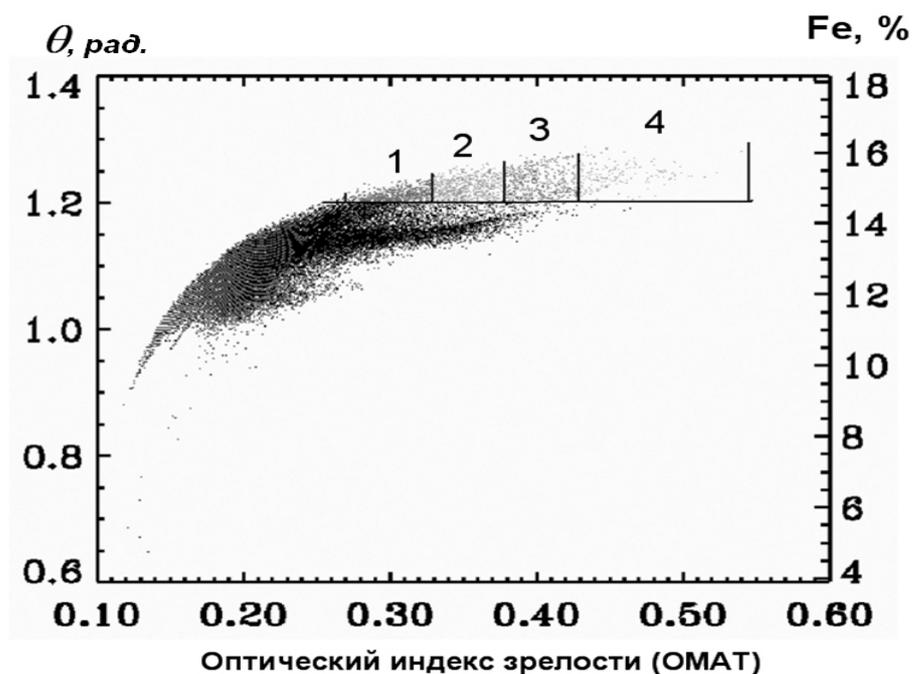


Рис. 6.

Показанная зависимость определена по методике Lucey с использованием спектральных данных, полученных КА «Clementine». С использованием той же методики был проведен анализ спектральной съемки кратера Даниель, проведенной с борта КА «Clementine». В данном случае

также была получена дистанционная оценка содержания железа (пироксенов) в поверхностном слое исследуемого материала (Pinet et al., 2000).

На рис. 7 приведено изображение кратера Даниель, полученное с разрешением 7 м/пк камерой, установленной на борту КА «Chang'E – 2» 23.10.2010г. с высоты 100 км. Цифрами обозначены исследованные склоновые перемещения материала. Детальное изображение склонового образования 3 с высоким разрешением приведено на рис. 8 (фрагмент изображения M106676014R, полученного с борта КА «LRO», разрешение оригинального изображения достигает 1,63 м/пк). Длинной стрелкой обозначено общее направление склона. Угол склона в этой части вала составляет около 18° . Короткими горизонтальными стрелками обозначена область предполагаемого обрушения.

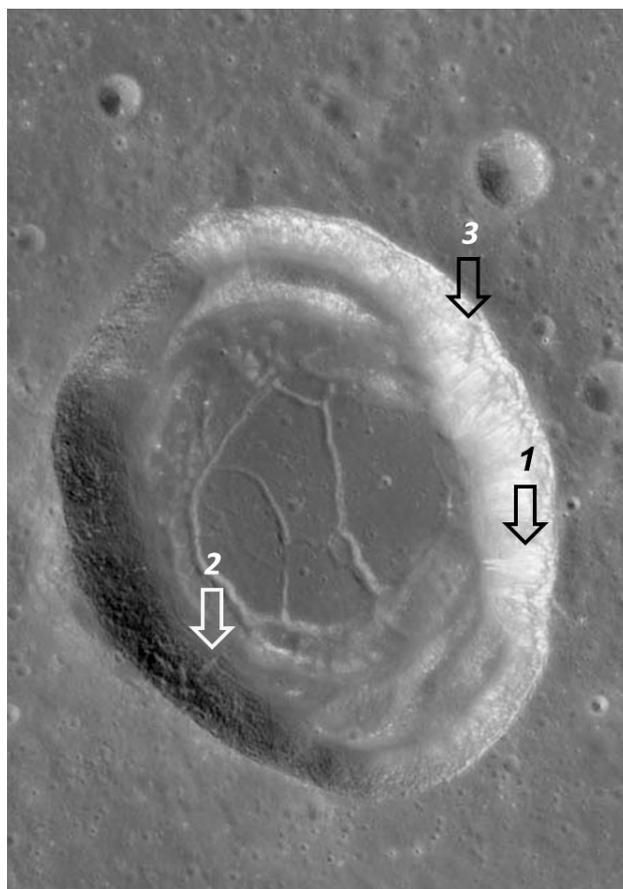


Рис. 7

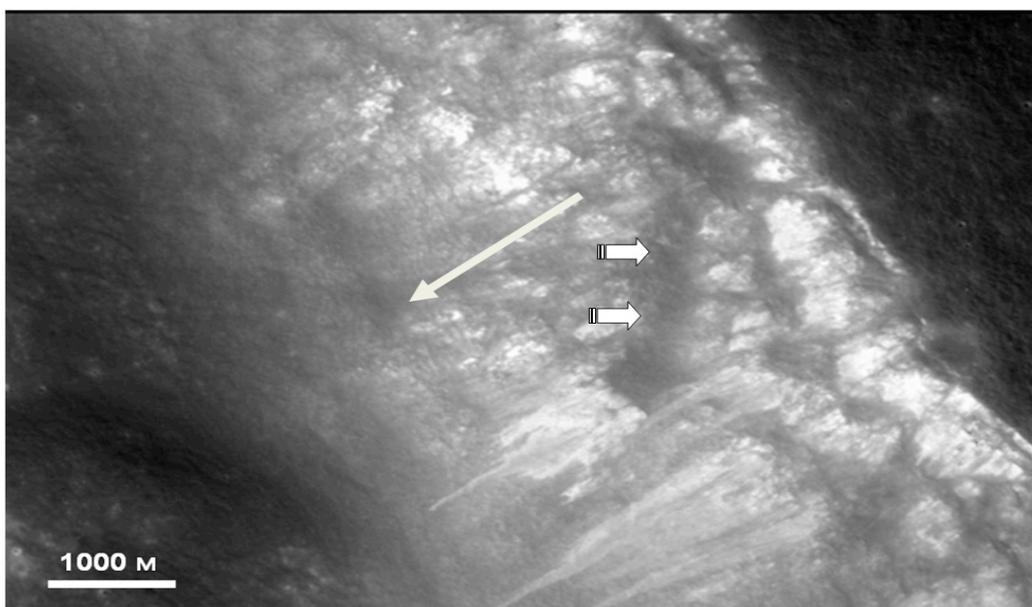


Рис. 8

Для определения содержания FeO в весовых процентах была использована следующая зависимость, полученная Lucey et al. (1998):

$$\text{FeO (вес. \%)} = -17,43 \arctan \left\{ \frac{(R_{950} / R_{750} - 1,19)}{(R_{750} - 0,08)} \right\} - 7,56,$$

где значения R_{750} и R_{950} измерялись по спектральным изображениям, показанным на рис. 9.

На рис. 9 представлены спектральные изображения исследуемого кратера, полученные с борта КА «Clementine» с использованием фильтра 750нм (R_{750}) и 950нм (R_{950}). Изображения построены с помощью автоматизированной программы, разработанной и реализованной в Лунно-Планетном Институте США (Lunar and Planetary Institute, USA, LPI Clementine..., 2011). Разрешение оригинальных изображений составляет примерно 100 м/пк. На диаграмме рис. 10 представлена зависимость содержания железа в поверхностном слое реголита от величины параметра Θ_{FeO} , который используется в методе Lucey et al. (1998). Прямое сопоставление полученных значений FeO с другими данными пока затруднительно, поскольку съемки рассматриваемого района, например, с помощью гамма-спектрометра с борта КА «Lunar Prospector» проводились с номинальным пространственным разрешением 150x150 км.

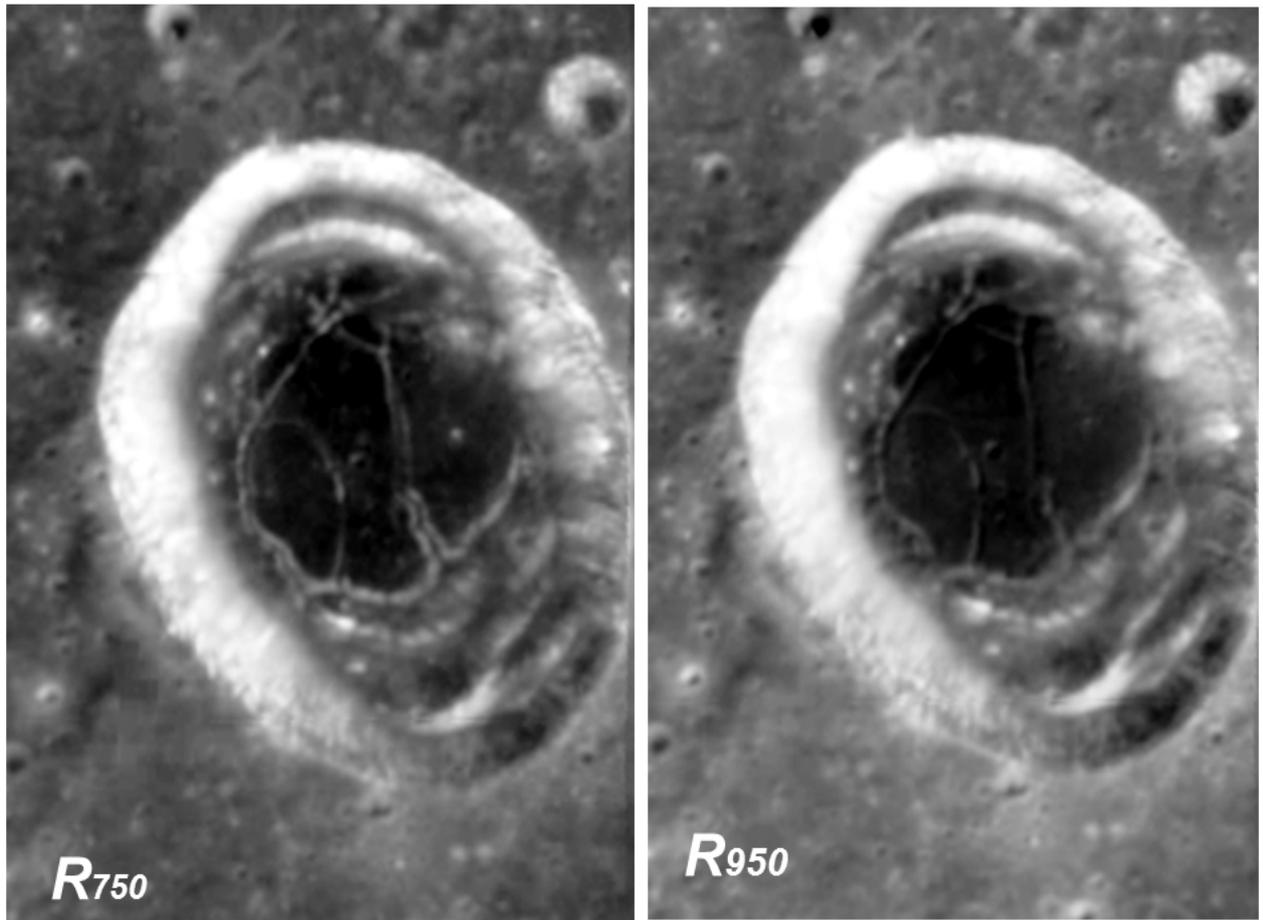


Рис. 9

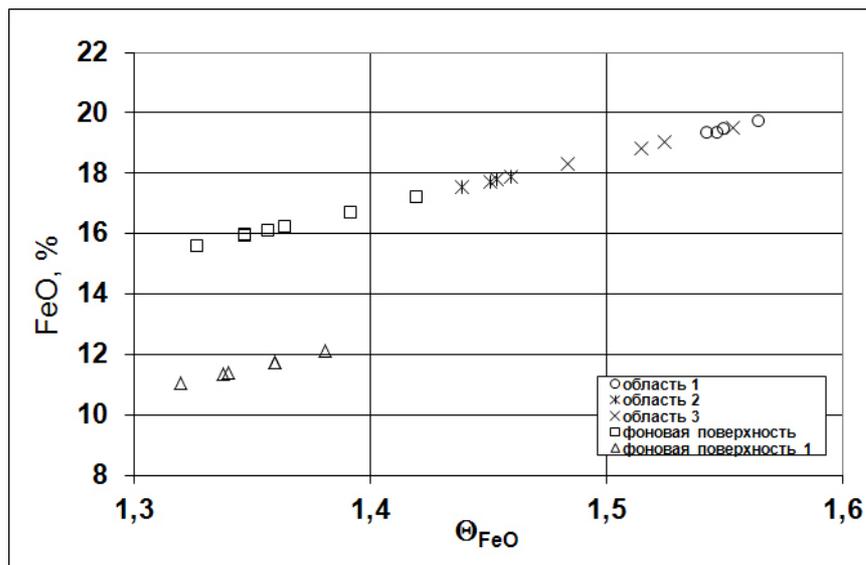


Рис. 10

Последующая переработка этих данных привела к улучшению разрешения до 45 км². С использованием переработанных данных нами были пересчитаны значения FeO для участков, соответствующих фоновой поверхности. На рис. 10 этот ряд значений обозначен как «фоновая поверхность 1». Систематические различия обоих рядов данных могут проистекать как из разницы в системах калибровки исходных величин, так и от существенных различий в разрешении. В последнем случае интегрирование параметров ведется по участкам, различающимся по площади на порядки. Однако, поскольку в предлагаемом исследовании главным является не определение абсолютных значений FeO, а тенденция их изменений, можно заключить, что результаты измерений, проведенных КА «Lunar Prospector», не противоречат нашим результатам.

Основной вывод, следующий из данных, показанных на рис. 10, заключается в том, что содержание железа в горизонтах пород, лежащих ниже «фоновой поверхности», т.е. ниже верхних слоев реголита, заметно увеличивается. В то же время, метод Lucey et al. (1998) позволяет дополнительно к приведенным сведениям дать оценку зрелости грунтов, т.е. провести сравнительный анализ экспозиционного возраста материала склоновых осыпей (области 1 и 2) и обнажений (область 3). Полученные характеристики зрелости грунта показали, что материал области 3 имеет те же свойства, что и фоновая поверхность. В связи с этим следует заключить, что образование в области 3 нельзя назвать «обнажением» в том смысле, как это понятие употребляется в практике земных геологических изысканий. По-видимому, материал обрушения находился в поверхностном слое, примерно, то же время, что и окружающая кратер «фоновая» поверхность. Материал осыпей в областях 1 и 2 отличается высокой степенью незрелости. Это обстоятельство предварительно можно интерпретировать как указание на постоянно происходящий процесс склонового перемещения вещества, приводящего к обнажению более свежего (незрелого) грунта (В.В.Шевченко и др., 2011).

Более подробный анализ был сделан с привлечением результатов определений по кратерам Бюрг и Мори А.

Глава IV. Содержание пород, обогащенных железом, как показатель генезиса лунных образований

В северо-западных и юго-западных областях исследованной области Океана Бурь, показанной на рис. 11, мы можем видеть аномалии содержания железа (А, А1, В), характеризующиеся значениями 25 – 27 вес.%.

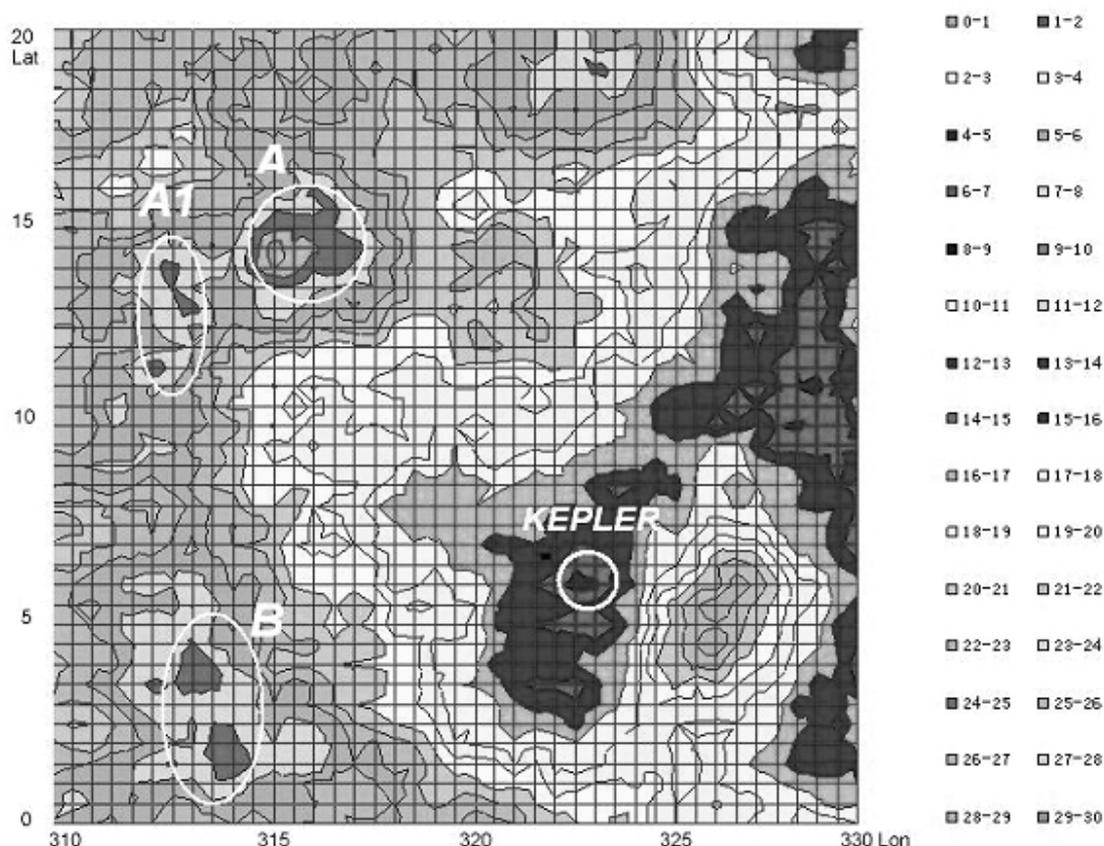


Рис. 11

Возможно, эти аномалии - места вулканических центров, которые являлись источниками молодых базальтов. Вулканизм в рассмотренной области был активен в течении длительного периода времени: от 3.93 до 1.2 млрд. лет, в общей сложности 2.7 млрд. лет. Эти, возможно, маленькие области А, А1, В, содержат самые молодые базальты из большинства глубинных базальтовых слоев лавы. Можно также заключить, что эти расплавы вышли на поверхность из наиболее глубоких горизонтов лунных недр, где содержание железа в базальтовой лаве превышает 25 - 27 wt% (Lu Y., 2010a).

Топографические характеристики Моря Москвы были исследованы по результатам лазерного альтиметрирования с борта КА «Chang'E-1» ((Huang, Ping et al., 2010).

Море Москвы расположено на восемь километров ниже внешнего кольца Московского бассейна диаметром 640 км. Сопоставление данных по содержанию железа (FeO) и топографических характеристик Моря Москвы подтверждает закономерность, согласно которой обогащенные железом породы располагаются на относительно низких уровнях.

Содержание железа в материале свежих обнажений служит существенной характеристикой лунного вещества в локальных масштабах. Согласно расчетам по схеме Lucey и др. (1998) среднее содержание Fe в относительно тонком верхнем слое мощностью около 80 м составляет 15,2 вес. %. Наиболее обширное и глубокое залегание материала с повышенным содержанием железа наблюдается на глубинах от 550 м до 830 м. При этом отличительной чертой данного вещества является его низкая степень зрелости. При оценках экспозиционного возраста время нахождения мелкодисперсной фракции в поверхностном слое составляет менее нескольких десятков лет.

Модель глубинных источников железосодержащих пород Луны имеет космогоническое значение. Плавление недр и их дифференциация происходили во внутренней части Луны на этапе ранней эволюции. Область базальтов с низким содержанием титана находится на глубинах 200—400 км. Этим процессом можно объяснить причину, различного содержания железа и титана на различных глубинах. Это случилось при формировании базальтовых морей Луны в результате выхода на поверхность расплавов из лунной мантии 3.9-3.15 млрд. лет назад. Если обобщить результаты проведенного исследования по сопоставлению абсолютного возраста базальтовых пород и содержания железа в этих породах и учесть полученные выше результаты по трехмерным моделям рельефа, можно построить обобщенную модель глубинных источников базальтовых лав разного содержания.

На рис. 12 приводится построенная нами модель глубинных источников пород с различным содержанием железа. В начальные эпохи эволюции Луны как космического тела на поверхность выходили расплавы базальтовых лав из верхних слоев лунной мантии с небольшим содержанием железа – около 10 % (см. диаграмму на рис. 3). Этот период истории Луны относится к эпохе 3,9 – 4,0 миллиарда лет. В средний период эволюции Луны на поверхность выходили базальтовые лавы с содержанием железа 15 – 20 %. Эта эпоха согласно данным

на рис. 3 длилась в течение 3,5 – 3,8 миллиарда лет. В поздний период лунные моря формировались лавами с содержанием железа 17 – 22 % из глубоких горизонтов мантии. Это происходило в период 3,1 – 3,3 миллиарда лет. В результате проведенной работы, нами были обнаружены выходы базальтовых лав предположительно из самых глубоких слоев мантии при содержании железа до 25 – 27 вес. % (см. карту на рис. 11). Вероятно, эти расплавы имеют возраст менее 2 миллиардов лет (Lu Y., 2010b).

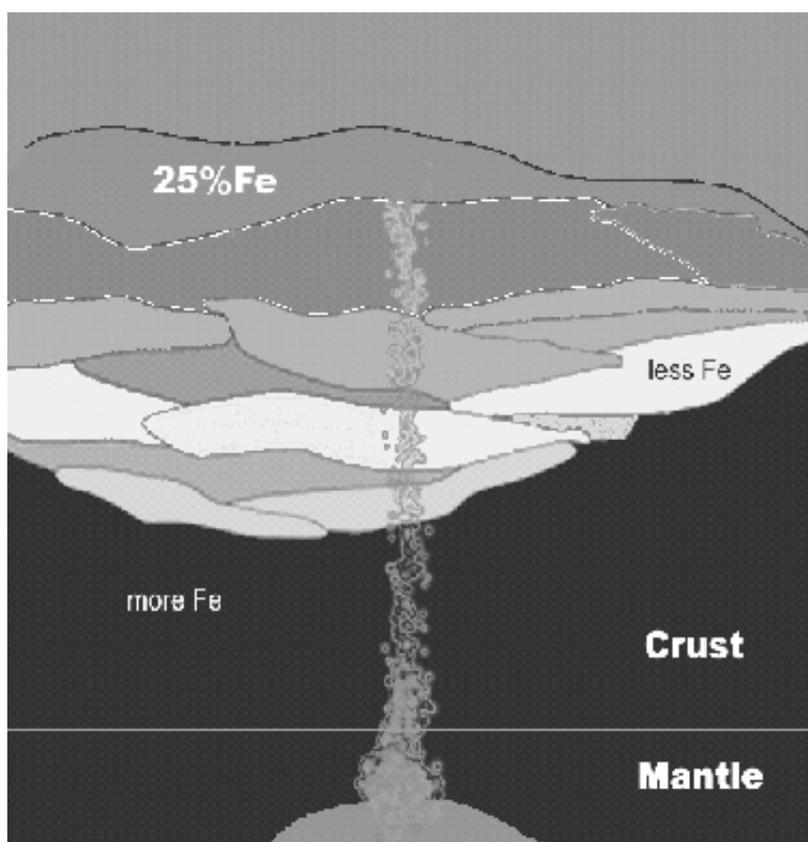


Рис. 12

Проведенные исследования позволяют оценить характеристики района, выбранного для посадки и последующей работы первого китайского лунохода «Chang'E – 3». Следует учесть, что одной из основных задач лунохода будет сбор образцов лунных пород и их экспресс-анализ непосредственно на лунной поверхности. Радиус действия лунохода предполагается равным около 5 км.

Залив Радуги и окружающие его горы являются одними из интересных деталей лунной поверхности. Область Залива Радуги представляет область, богатую свидетельствами исторической эволюции поверхности Луны. Вместе с тем эта местность имеет сравнительно сглаженный рельеф (средняя величина

склонов ~ 2 градуса), что наилучшим образом подходит для посадки последующего движения лунохода в процессе сбора образцов. Выбранная область представляет интерес для перспективной китайской лунной программы (Chen ShengBo et al., 2010).

Исходя из результатов наших исследований, следует заключить, что такая характеристика, как содержание железа в поверхностных лунных породах имеет существенное значение для окончательного выбора места посадки. На рис. 13 приводится карта распространения поверхностных пород с различным содержанием железа по данным спектральной съемки с борта КА «Clementine».

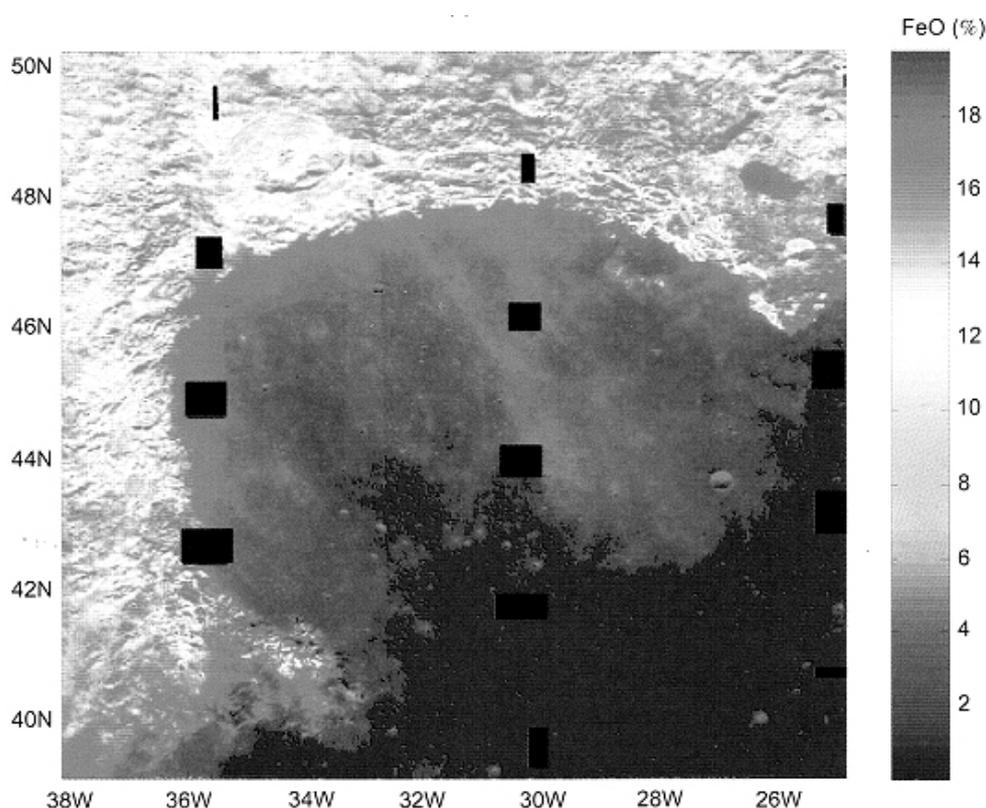


Рис.13

Заключение

В заключении приведены основные результаты, выносимые на защиту.

Список литературы

В.В.Шевченко, Современная селенография. М: Наука,1980, с. 25-31.

В.В.Шевченко и др. Спектрополяриметрический индекс зрелости лунного грунта // Астрон. вестн. Т. 37. № 3. 2003. С. 1-22.

Шевченко В. В., П. К. Пине, С. Д. Шеврель, И. Даду, Я. Лу, Т. П. Скобелева, О. И. Кварацхелия, К. Роземберг. Современные склоновые процессы на Луне // Астрон. вестн. Т. 46. №. 1. 2012. С. 3–20.

Chen ShengBo, Meng ZhiGuo, Cui TengFei et al. Geologic investigation and mapping of the Sinus Iridum quadrangle from Clementine, SELENE, and Chang'e-1 data // Science China Physics, Mechanics and Astronomy, Volume 53, Issue 12, 2010, p.2179-2187.

Huang Q., Ping J.S. et al. Improved global lunar topographic model by Chang'E-1 laser altimetry data // 41th LPSC 2010, # 1265.

Lu Y. Correlations Between Iron Abundances and Lunar Surface Features: Crater Kepler Area // 41st Lunar and Planetary Science Conference, 2010a, The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1533, p.1258.

Lu Y. Iron abundances in lunar regolith and a model of evolution of the lunar surface. In «New advances in lunar exploration», Macao, 2010b, p. 215-219.

Lucey P.G., Blewett D.T., Hawke B.R. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery // J. Geophys. Res. 1998. V.101 (E1). P. 3679-3699.

Pinet P.C., Shevchenko V.V., Shevrel S.D. et al. Local and regional lunar regolith characteristics at Reiner Gamma formation: optical and spectroscopic properties from Clementine and Earth-based data // J. Geophys. Res. 2000.V.105 (E4). P.9457-9475.

Ouyang Ziyuan. Introduction to Lunar Science. CAPH. 2005. P. 304-318.

