

КРАТКИЙ ОБЗОР НОВЫХ ДАННЫХ О ВЕЩЕСТВЕННОМ СОСТАВЕ, МОРФОЛОГИИ КРАТЕРОВ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

В. И. Сиротин, А. А. Бережной*

Воронежский государственный университет

*Государственный астрономический институт им. Штемберга,
Московский государственный университет

Поступила в редакцию 25 февраля 2011 г.

Аннотация. На основе новых данных об элементном составе (Fe, Mg, Al) известных кратеров Луны (Коперник, Аристарх, Тихо, Циолковский, Деландер, Эйткен, Лангрэн) и прилегающей межкратерной местности они делятся на три группы по содержанию указанных элементов. Первая группа характеризуется повышенным содержанием Al, вторая – увеличением Mg и Fe, морфологией и по составу базальтов, слагающих внутрикратерные равнины, отнесена к лунным «озёрам», являясь уменьшенным аналогом лунных «морей». Третья группа занимает промежуточное положение и относится к материковой обратной стороне Луны. Начиная с эратосфенского и более отчётливо коперниканского периода, т. е. 3,15 млрд лет назад, происходит затухание вулканизма импактного происхождения и на этом фоне становится заметным вулканизм центрального типа, связанный с лавой астеносферного происхождения.

Ключевые слова: кратеры, Коперник, элементный состав, импактное происхождение, КА Kaguya.
Abstract. Three groups are standed between known craters of the moon (Copernicus, Aristarchus, Tycho, Ziolkowski, Delander, Aitken, Langree) and adjacent areas by new data on the content of elemental composition (Fe, Mg, Al). The first group is characterized by a high content of aluminium. The second is characterized by an increase in Mg and Fe and the morphology and composition of crater plains' basalts, referred to the moon "lakes", being reduced as analog of the lunar "seas". The third group takes an intermediate position and refers to the mainland side of the moon. Starting with Eratosthenes and more clearly Copernican period, i.e. 3.15 billion years ago, impact origin of volcanism is damping and against this associated with asthenospheric lava volcanism of the central type becomes more clear.

Key words: craters, Copernicus, elemental composition, impact origin, KA Kaguya

После последнего полета на Луну американского космического аппарата Аполлон-17 в декабре 1972 года был взят длительный перерыв в посещении спутника человеком. Однако это не означало вовсе, что про Луну «временно забыли». Напротив, в США, Китае, Японии, Индии, в европейском космическом агентстве ведутся активные подготовительные работы для полётов на Луну, но теперь с новой целью – начать строительство на Луне постоянно действующих станций, для чего тщательно выбираются посадочные места на поверхности нашего спутника с учётом длительного пребывания человека. Строение Луны по результатам сейсмических станций, расположенных на её поверхности показано на рис. 1 [1, 2].

В нашем распоряжении оказался небольшой, но весьма ценный материал по элементному составу (Fe, Mg, Al) пород семи известных кратеров Луны, в сравнении с элементным составом пород прилегающей материковой местности (табл.). Назовём этот состав кратерной разновидностью (фацией) пород поверхности Луны. Прежде чем перейти к анализу этого состава следует напомнить, что известно по вещественному составу Луны по результатам предыдущих исследований. Выделяется чётко несколько видов пород (ассоциаций) [3, 4, 5].

1. Анортозиты высокогорий, в т. ч. незначительно обогащенные Fe и Mg (ферроанортозиты и Mg-комплекс), неморские базальты. Важным компонентом неморских базальтов является KREEP-ассоциация. Базальты этой ассоциации, кроме по-

вышенных значений К, REE и Р, могут содержать в сотни раз больше, чем в хондритах СI, Zr, Ва, U, Th, Hf и др. литофилов с большими ионными радиусами.

2. Базальты лунных морей с широким спектром разновидностей: ильменитовые, кристобалитовые, тридимитовые, оливиновые, пижонитовые и др. Кроме того, они разделяются на низко- и высокотитанистые, которые, в свою очередь, разделяются на несколько подгрупп по содержанию Al и К.

Все остальные породы относятся к категории редких, весьма незначительные их фрагменты установлены в реголите материков, но некоторые из редких заслуживают пристального внимания: 1) это ультраосновные породы (перидотиты, дуниты, гарцбургиты, лерцолиты), их нужно рассматривать как продукт самой ранней дифференциации Луны (на стадии магматического океана), опустившийся на дно магматического океана, т.е. на глубину свыше 100 км, а затем выброшенный

на поверхность в результате мощного импактного события; 2) это фрагменты кислых пород гранитного состава, отвечающих кислому мезостазису морских и KREEP-базальтов, по минеральному составу они отвечают гранитам, поскольку содержат тридимит, кристобалит, К-Ва полевой шпат, плагиоклаз среднего состава, второстепенные (апатит, циркон и др.); возможно, это зачатки сиала, не получившие развития по разным причинам, в т.ч. из-за ранней потери Луной воды. Модельный возраст брекчии, в которой обнаружен этот фрагмент – 4.52 млрд лет, т.е. равен возрасту Луны.

Хотя описания семи названных кратеров (табл. 1) известны в статьях и монографиях [1, 2, 3, 4, 7, 8], в свете заданной темы их следует кратко охарактеризовать, тем более, что по содержанию Fe, Mg и Al их можно объединить в 3 группы.

1-я группа включает три кратера: Коперник, Аристарх и Лангрэн. Видимо, сюда же относится и кратер Эратосфен.

Таблица

Содержание элементов в лунных породах

Название структуры	Аномалия, %					
	В кратере вулкана			В прилегающей к вулкану местности		
	Fe	Mg	Al	Fe	Mg	Al
Коперник	8–10	5–7	14–16	12–14	9–11	9–11
Аристарх	6–8	5–7	12–14	7–10	12–14	7–9
Лангрэн	7–9	5–7	16–18	12–14	9–11	8–10
Тихо	22–25	11–13	5–7	12–14	10–12	10–12
Циолковский	21–24	9–11	5–8	10–12	3–5	8–9
Эйткен	13–15	8–10	7–9	8–10	4–6	11–14
Деландер	10–14	6–8	3–7	8–10	3–5	15–17

Кратер Коперник – самый молодой (возраст около 1 млрд лет) в семействе крупных кратеров, его диаметр 93 км, располагается на лицевой части Луны с хорошо выраженным кольцевым валом и центральной горкой, располагается к юго-юго-западу от моря Дождей, примерно в 1000 км (рис. 2, № 18) знаменит своей морфологической сохранностью, относится к самым молодым кратерам Луны, его именем названа самая молодая коперниканская система лунной стратиграфии (начало около 1.0 млрд лет и до ныне), знаменит также лучевыми выбросами светлого материкового вещества. Лучи выбросов достигают даже

Моря Дождей, накладываясь на его тёмную базальтовую поверхность. Часть поверхности за кольцевым валом осложнена радиальными гребнями – лучами, отходящими от вала на расстояние до 50–80 км.

К востоку от кратера Коперник расположены несколько цепочек кратеров, образующих своеобразный узор – это система вулканических куполов и вулканических проседаний. Любопытно, что купола очень напоминают земные вулканы типа Везувия, т.е. эти вулканы не импактного, а магматического происхождения, хотя на формирование магматических очагов, особенно расположенных

в лунной литосфере, наверняка оказали влияние импактные события [1, 2].

Назовём эти кратеры материковыми, поскольку они характеризуются повышенными содержаниями Al до (18 %), а продукты их извержения кратерной фацией, скорее всего, анортозитовой, однако постоянное присутствие Fe и Mg указывает на то, что это Fe- и Mg-анортозиты. Можно предположить, что обогащение Fe и Mg произошло вследствие вулканической деятельности самого вулкана. Прилегающая местность обогащена этими же элементами также, но на несколько процентов больше, возможно, она сложена продуктами более раннего извержения вулкана.

Во вторую группу отнесены два кратера – Тихо и Циолковского. Кратер Тихо расположен в южном полушарии Луны (рис. 1, № 61), его диаметр 85 км. Американский КА «Луна-Орбител» выявил многие детали его топографического строения: от внешнего кольцевого вала отходят во все стороны светлые лучи, образующие узор – визитная карточка этого вулкана, лучи протягиваются на сотни км, достигают Океана Бурь (на север) и Моря Нектар (на восток). Характеризуется также террасированными внутренними склонами, чётко выделяющейся центральной горкой, застывшей лавой, заполнившей обширный внутренний бассейн с достаточно гладкой и почти горизонтальной поверхностью, с выступающими из под неё камнями-глыбами, не перекрытыми полностью лавой (рис. 1, № 61, рис. 3). Большинство американских исследователей считают лаву результатом импактного плавления (рис. 2). Учитывая расположение и морфологию кратера, его вполне можно использовать как посадочную площадку для будущих лунных экспедиций и строительства постоянно действующих станций.

Кратер Циолковского (рис. 3, 4, 5) расположен на обратной невидимой стороне Луны в южном полушарии, оно не богато морями, к тому же они своеобразны, поскольку не имеют чётко выраженных признаков морей. Диаметр кратера Циолковского 240 км (рис. 4), его строение очень напоминает кратер Тихо, но все структурные признаки его ещё ярче выражены: центральная горка, широкое и плоское днище залито тёмной лавой, склоны отчётливо террасированы.

В эту же группу следует отнести кратер Деландер, расположенный на лицевой стороне Луны в 200 км от кратера Тихо к северо-востоку, имеет кольцевой вал и центральную горку, его диаметр 250–300 км, осложнён несколькими

мелкими кратерами размером 25–30 км, наложенными на кольцевой вал и ровную внутри кратерную поверхность между горкой и валом. Таким образом, охарактеризованные структуры занимают промежуточное положение между вулканами-кратерами и лунными морями, поэтому геологи склонны относить их к лунным «озёрам», имея в виду, в первую очередь, увеличение их размера и появление обширного базальтового покрова внутри кольца и вокруг центральной горки.

Приведённые в таблице данные по содержанию Fe, Mg, Al в этой популяции кратеров отличает их от первой заметным увеличением Fe и Mg и резким уменьшением Al. Всё это может указывать на мантийное (астеносферное) формирование лавы.

К третьей группе отнесены кратеры, занимающие промежуточное положение между этими двумя группами: кратеры Эйткен и Деландер. Кратер Эйткен находится на обратной стороне Луны в составе громадного бассейна Южный Паул-Эйткин. Содержание Fe и Mg в обоих кратерах заметно больше, чем у кратеров первой популяции, но заметно меньше, чем у кратеров второй популяции; содержание Al соответствует второй популяции (т.е. в пределах 5–8 %).

Кратер Деландер (рис. 1, № 66) располагается на лицевой стороне в южном полушарии, недалеко от кратера Тихо, к северо-востоку от него, по размеру он крупнее, диаметр его около 150 км и он более древний, чем кратер Тихо, поскольку и днище кратера, и кольцевой вал осложнены кратерами более мелкими, самый крупный из них – кратер Вальтер полностью разрушил часть кольцевого вала Деландера в восточной части.

Следует отметить, что представлению о Луне как об абсолютно мёртвой планете противоречат не только луотрясения, но и выделение газов, сопровождаемое свечением, по крайней мере, в двух местах лицевой стороны Луны. Одно из них расположено к востоку от хорошо известного кратера Аристарх в долине Шретера и известно под названием Голова Кобры (рис. 5). Долина протягивается по поверхности плато Аристарха на 150 км постепенно сужаясь от 10 км (у выхода из кратера) до 1 км, по плоскому днищу прослеживается извилистая полоса шириной до 400 м, которая, скорее всего, является тектонической трещиной, через которую происходило излияние лавовых потоков. Выделение и свечение газов наблюдается в месте выхода долины из кратера. Второе место было известно и ранее – это кратер

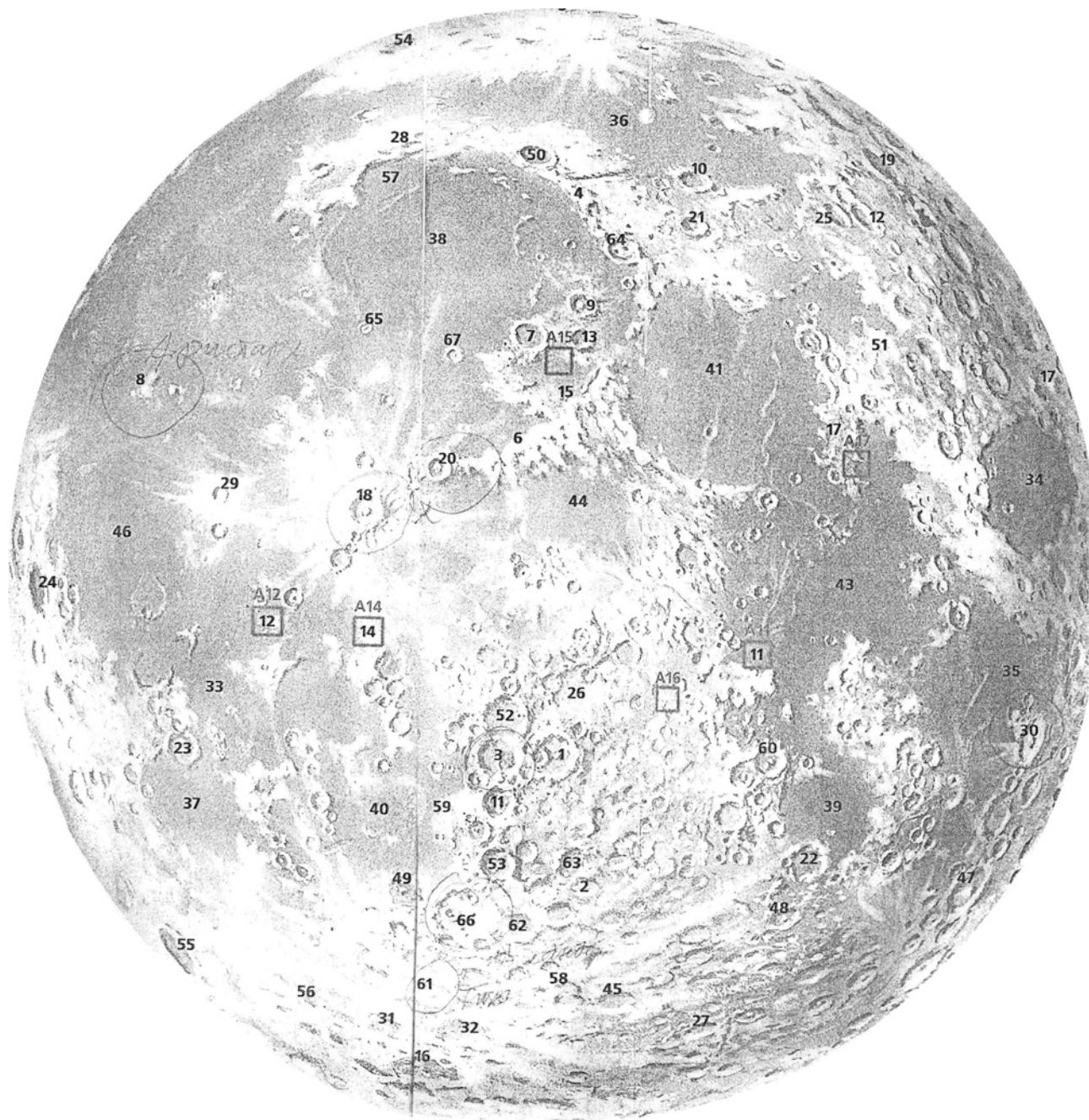


Рис. 1. Видимая сторона Луны (кратеры): 1 – Ал-Баттений, 2 – Алиацензий, 3 – Альфонс, 4 – Альпы, 5 – Анаксагор, 6 – Апеннины, 7 – Архимед, 8 – Аристарх, 9 – Аристилл, 10 – Аристотель, 11 – Арзахель, 12 – Атлас, 13 – Автолик, 14 – Катарина, 15 – Кавказ, 16 – Клавдий, 17 – Клеомед, 18 – Коперник, 19 – Эндимион, 20 – Эратосфен, 21 – Евдокс, 22 – Фракасторий, 23 – Гассенди, 24 – Гримальди, 25 – Геркулес, 26 – Гиппарх, 27 – Жансен, 28 – Урал, 29 – Кеплер, 30 – Лангрэн, 31 – Лонгмонтан, 32 – Маджени, 33 – Море Познания, 34 – Море Кризиса, 35 – Море Изобилия, 36 – Море Холода, 37 – Море Юмора, 38 – Море Дождей, 39 – Море Нектара, 40 – Море Облаков, 41 – Море Ясности, 42 – Море Смита, 43 – Море Спокойствия, 44 – Море Пара, 45 – Мавролик, 46 – Океан Бурь, 47 – Петавий, 48 – Пикколомини, 49 – Питат, 50 – Платон, 51 – Посейдон, 52 – Птолемей, 53 – Пурбах, 54 – Пифагор, 55 – Шикард, 56 – Шиллер, 57 – Залив Радуги, 58 – Стефлер, 59 – Прямая Стена, 60 – Теофил, 61 – Тихо, 62 – Вальгер, 63 – Вернер, 64 – Кассини, 65 – Эйлер, 66 – Деландер

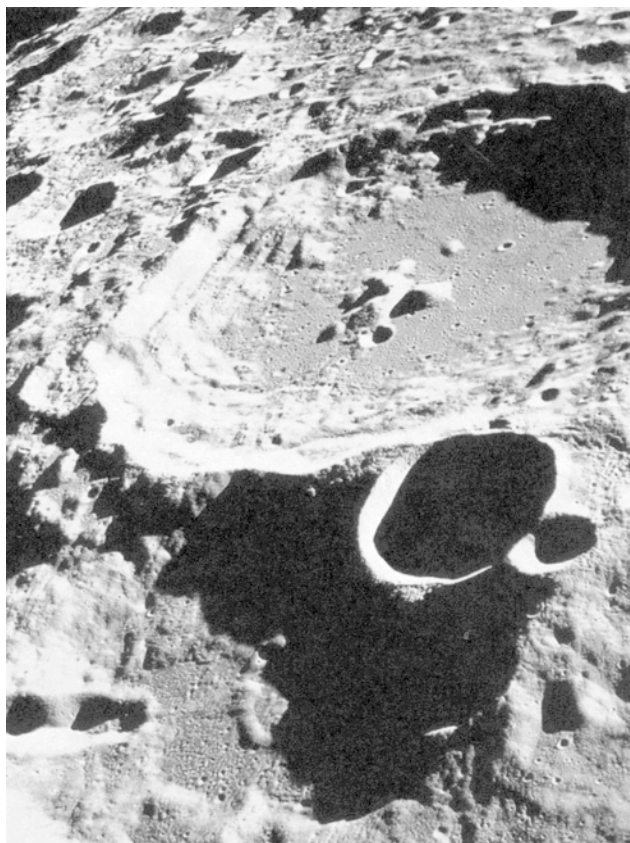


Рис. 2. Классический лунный кратер IAU 308 на обратной стороне, диаметр кратер около 80 км, аналог кратера Тихо

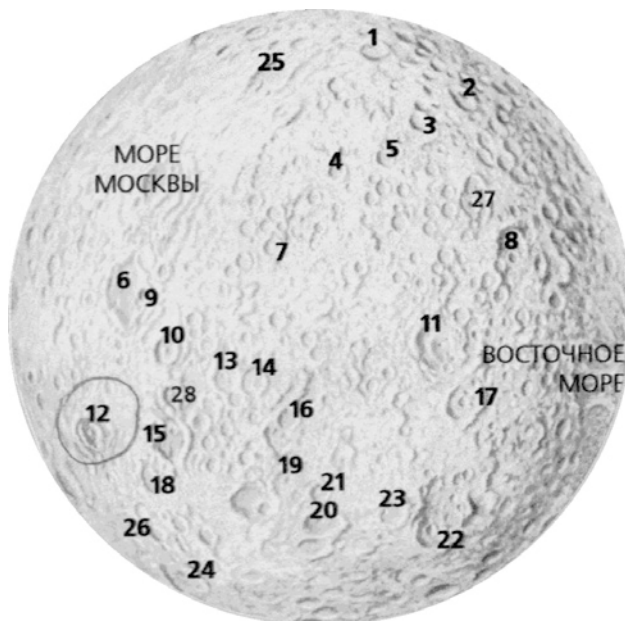


Рис. 3. Обратная сторона Луны, показаны наиболее крупные кратеры: 1 – Биркхоф, 2 – Ландау, 3 – Ковалевская, 4 – Фицджеральд, 5 – Кокрофт, 6 – Менделеев, 7 – Андерсон, 8 – Герцшпрунг, 9 – Шустер, 10 – Чаплыгин, 11 – Королёв, 12 – Циолковский, 13 – Киллер, 14 – Хейвисайд, 15 – Гагарин, 16 – Эйткен, 17 – Галуа, 18 – Павлов, 19 – Ван дер Граф, 20 – Левенгук, 21 – Лейбниц, 22 – Аполлон, 23 – Оппенгеймер, 24 – Планк, 25 – Д’Аламбер, 26 – Рош, 27 – Мах, 28 – Жюль Верн



Рис. 4. Кратер Циолковского на обратной стороне Луны, диаметр 240 км, стенки образуют террасы, в центре есть горка, дно залито тёмной лавой. Гладкое пространство, занятое лавой, настолько велико, что геологи предлагают называть его «лунным озером», т. е. это промежуточная структура, уступающая «лунным морям»



Рис. 5. Кратер Аристарх и долина Шретера (справа) с разломом лунной коры, в районе которого наблюдается свечение выделяющихся из недр газов

Альфонс в юго-восточном горном обрамлении Океана Бурь.

За последние двадцать лет продолжались исследования Луны с орбитальных космических аппаратов. Мощная «бомбардировка» Луны была произведена в 2007 году: космическая ступень ракеты AtlasV с большой скоростью врезалась в лунную поверхность, выбив гигантский столб пыли. Результаты эксперимента опубликованы в нескольких номерах журнала Science. С помощью радиометра Diviner, регистрирующего излучение в среднем инфракрасном диапазоне удалось уточнить минеральный состав материковой поверхности Луны. В нескольких пунктах наблюдения удалось зафиксировать признаки кварца, в единичных пунктах – совместное нахождение кварца и полевого шпата, т. е. гранита. Однако, памятуя о не очень достоверных результатах КА «Лунар проспектор» по изучению состава реголита Луны с помощью нейтринного спектрометра, США совместно с Россией запустили два аппарата с целью поиска воды на Луне и удобных мест для будущих баз космонавтов. Было задумано сбросить весомый груз на поверхность Луны. В лунном реголите при первой бомбардировке были обнаружены следы воды, однако вторая бомбардировка с помощью российско-американского аппарата кратера Кабео у Южного полюса зафиксировала воду в столбе пыли, образованном бомбардировкой ступенью ракеты «Центавр» и аппаратом LCROSS 9 октября 2009 года [9,10].

Вместо заключения (послесловие)

Американская сейсмическая лунная программа «Apollo», включающая установку сейсмометров на поверхности Луны, развеяла миф о Луне как о мёртвом теле: первый же сейсмометр зафиксировал лунотрясения, более того, Луна оказалась настолько «чувствительной», что даже шаги аэронавтов фиксировали сейсмометры. Сейчас выделяют четыре вида лунотрясений: приливные (самые мощные), тектонические, ударные и термальные. После обнаружения такой тектонической особенности Луны и появилось крылатое выражение американских аэронавтов: «Луна звенит как колокол». Таким образом, в истории Луны вулканическая деятельность началась с образования магматического океана (донектарисовая система 4.56–3.92 млрд лет), а затем и лунной коры и постоянно поддерживалась и провоцировалась в течение нектарисового (3.92–3.85 млрд лет) и имбрианского (3.85–3.15 млрд лет) периодов. В эра-

тосфенский и коперниканский периоды на фоне затухания импактных процессов заметнее проявлялась собственно вулканическая деятельность, менее зависимая от импактных ударов [3, 4, 5]. С помощью российско-американского космического аппарата LRO-LCROSS установлено, что плотность крупных импактов значительно выше, чем мелких, причём более крупные импакты возникли до рубежа 3,8 млрд лет. Подтверждается, что роль импактов в вулканической деятельности в послембрианское время резко сократилась, поскольку энергии удара мелких импактов было недостаточно для возбуждения астеносферного магматизма.

Большой успех сопутствовал в исследовании кратеров и поверхности Луны японскому космическому агентству – в сентябре 2007 года был успешно запущен КА «Кагуя», в октябре он вышел на лунную орбиту с высотой над поверхностью 96 км. С помощью совершенной аппаратуры, включающей одновременно три работающих камеры, были получены уникальные снимки поверхности, по крайней мере, на порядок выше по разрешающей способности всех предыдущих американских и совместных российско-американских снимков. Важным итогом проведённых исследований явилось уточнение вещественного состава поверхности, были, в частности, выделены и закартированы «оранжевые зоны» Луны, японцы даже назвали их «месторождениями оранжевых стекол». Оранжевые стекла в виде шариков и ранее выделялись в реголите Луны и связывались с пульверизирующей газонасыщенной лавой Луны. Впервые они были выделены Гаррисом Шмиттом в декабре 1972 года. Но японцы открыли целые залежи оранжевого стекла, назвали их месторождениями и закартировали 14 таких месторождений. Сброшенный на поверхность Луны груз вызвал образование высокого в несколько км столба пыли, в котором были обнаружены пары воды (место падения японцы назвали символически «Морем слёз»). Открытие воды в поверхностном слое Луны – это главное открытие японцев [9].

Свои открытия японские учёные проецируют на историю Земли и особенно на историю возникновения эволюции жизни. Многие их представления на этот счёт слишком эмоциональны (под влиянием несомненных открытий «Кагуи»), но спорны. Японцы предлагают земной вариант возникновения жизни на Земле. Около 4 млрд лет назад произошло резкое усиление бомбардировки Земли метеоритами. Железные метеориты врезались в океан, в результате возникла смесь С, N и

Fe. Метеориты имели скорость около 3000 км/час, температура повышалась до 6000 °С, а давление возрастало в 6000 раз. В этих довольно экстремальных условиях рождались аминокислоты – основа для возникновения жизни. Эти условия они воссоздали в опыте и им удалось получить аминокислоты. Другие варианты зарождения жизни японские исследователи не рассматривают [5, 6].

Была значительно уточнена в деталях морфология многих известных кратеров, например, Тихо, определена высота центральной горки (2480 м), начальная глубина (до 15 км), определён размер импакта (8 км), что вполне соответствует диаметру кратера (83 км). На Земле подобные события также имели место и самое последнее из них – около 65 млн лет назад, которое привело к образованию в районе Юкотана (Мексика) кратера с близкими начальными параметрами и с центральной горкой.

Человечество ждёт новых открытий на Луне, которые помогут уточнить и историю нашей планеты.

Воронежский государственный университет
В. И. Сиротин, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой общей геологии и геодинамики
ogg@geol.vsu.ru
Тел. 8 (473) 220-86-82

Московский государственный университет
А. А. Бережной, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института им. Штемберга
ogg@geol.vsu.ru
Тел. 8 (473) 249-12-06

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ранцини Жанлука*. Космос. Сверхновый атлас Вселенной // Жанлука Ранцини; пер. с англ. Г. Семёновой. – М. : Эксмо, 2003 – 216 с.
2. *Дубкова С. И.* Семейные тайны Солнечной системы. Часть II. Чудесное семейство планет / С. И. Дубкова. – М. : Белый город, 2005. – 192 с.
3. *Очерки сравнительной планетологии*. – М. : Наука, 1981 – 326 с.
4. *New the solar System*. – Cambridge : Cambridge University Press, 1999. – 421 p.
5. *Сиротин В. И.* Сравнительная планетология : учебное пособие / В. И. Сиротин. – Воронеж : Изд.-полиграф. центр Воронежского госуниверситета, 2009. – 168 с.
6. *Кометы и происхождение жизни*. – М. : Мир, 1984. – 228 с.
7. *Маров М. Я.* Планеты Солнечной системы / М. Я. Маров. – М. : Наука, 1981. – 256 с.
8. *Ударные кратеры на Луне и планетах* / А. Т. Базилевский [и др.] – М. : Наука, 1983. – 200 с.
9. *Шевченко В. В.* Вода сухой Луны / В. В. Шевченко // Земля и Вселенная. – 2010. – № 4. – С. 3–17.
10. *Лазарев Е. Н.* Карта рельефа полярных областей Луны / Е. Н. Лазарев, Ж.Ф. Родионова // Земля и Вселенная. – 2010. – № 4. – С. 18–25.

Voronezh State University
V. I. Sirotnin, Doctor of the Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Geodynamics and Geological Processes
ogg@geol.vsu.ru
Tel. 8 (473) 220-86-82

Moskow State University
A. A. Berezhnoy, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, leading research worker State Astronomical Institute of Shtemberg
ogg@geol.vsu.ru
Tel. 8 (473) 249-12-06