

РАЗДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И ИЗОТОПОВ В ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

К ИСТОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

К.П.Флоренский, А.В.Иванов, А.Т.Базилевский

ВВЕДЕНИЕ

Едва ли не наибольшими изменениями, происшедшими в сознании геологов нашей страны за последние тридцать лет, следует считать изменения, вызванные широким применением методов геохимии изотопов, тесно связанным с именем Александра Павловича Виноградова. Не говоря о прояснении многих петрогенетических взаимоотношений, достаточно вспомнить хотя бы только метод изотопной геохронологии, применение которого раздвинуло область исторической геологии от низов фанерозоя, т. е. от 600 млн. лет, в 3–4 раза почти до границы протерозоя и архея (около 2,5 млрд. лет назад). Положение образцов горных пород, имеющих возраст до 3,5 млрд. лет, в общей истории Земли все еще остается недостаточно ясным; история архея представляется фрагментарной и скорее относится к геологической археологии.

Наиболее существенные результаты, характеризующие начальные условия геологической истории планет, получены при изучении Луны, на поверхности которой преобладают горные породы с возрастом 3–4 млрд. лет. Таким образом, изучение Луны космическими средствами следует рассматривать как крупнейшее наступление на геологическое

время, без которого вряд ли удастся понять первоосновы, определяющие всю последующую историю земной коры. История Луны является фактически естественным путем для продолжения истории Земли вглубь, к самым истокам формирования облика планеты.

Наиболее существенным выводом, который можно видеть при рассмотрении сравнительной истории Земли и Луны, следует считать то, что геологические процессы, развитые на поверхности обеих планет в течение последних 3 млрд. лет, в общем незначительно меняют свои особенности. Эволюция принципиального облика планеты за это время относительно невелика, что позволяло геологам широко пользоваться принципом актуализма. Лишь в основании нижнего докембрия Земли можно предполагать ряд особенностей в развитии тектоники и характере геохимических процессов, которые требуют признания особых, несовместных с современными условий.

При изучении Луны мы впервые встречаемся с бесспорностью этого требования и видим, что облик планетного тела в основном определяется уже в ранний период развития специфических процессов, угасающих в дальнейшей истории. Сейчас, хотя и нет бесспорных доказательств того, что ранняя история Земли подобна лунной, представляется логически неизбежным допускать близкий ход развития при становлении верхних оболочек планет и, во всяком случае, учитывать пример развития Луны при попытках воссоздать древнейшие этапы развития Земли. Ярким отличием Луны является широкое развитие кольцевых структур всех размеров. Поэтому усилия исследователей более 100 лет направлены на стремление расшифровать природу кратерообразования как основного фактора развития ее поверхности с древнейших времен. В зависимости от решения этого основного вопроса резко меняются схемы общего развития Луны.

ПРИРОДА КРАТЕРООБРАЗОВАНИЯ ЛУНЫ И КРАТЕРНЫЙ МОРФОЛИТОГЕНЕЗ

После получения космических снимков Марса («Марс-4, 5», «Маринер-6, 7, 9») и Меркурия («Маринер-10»), установивших широкое развитие кратеров на древнейших участках поверхности планет, интенсивное кратерообразование не может рассматриваться как курьезная особенность Луны, а приобрело всепланетное значение. Со всей серьезностью можно говорить об импактной стадии (как ее назвал А.П.Виноградов) развития всех планет земной группы, которая неминуемо наложила свой отпечаток на все последующее геологическое и геохимическое развитие планет. Признание эндогенной (вулканической), или баллистической (метеоритной) гипотезы кратерообразования, по существу, в какой-то степени должно согласоваться с признанием первичности горячего (в духе гипотезы Канта–Лапласа) или холодного происхождения планеты (как это представляли О.Ю.Шмидт, В.И.Вернадский, А.П.Виноградов и большинство современных геохимиков и астрономов). Разумеется, что говоря о кратерообразовании в планетарном масштабе как о едином ведущем морфолитогенетическом процессе, типичном для определенной стадии развития планет, вовсе не следует забывать о других типах кратеров, которые могут несомненно иметь место как частные случаи, усложняющие понимание основного процесса. К сожалению, спор, который продолжается до последнего времени¹, в существенной части поддерживается нечеткой методической постановкой вопроса в целом. Слишком часто путаются два вопроса, имеющие вполне

¹ В связи с этим уместно вспомнить ответ акад. М.В.Келдыша на вопрос корреспондента на пресс-конференции после посадки автоматической станции «Луна-9».

Вопрос: В чей огород брошен камешек, видный на лунной фотографии, — в лагерь ученых-метеоритчиков или вулканологов?

Ответ: Я думаю, что они еще имеют возможность перебрасывать этот камешек друг другу.

самостоятельное значение: первичное происхождение кратерной формы и условия ее последующей эволюции. Между тем здесь следует рассматривать два различных процесса, которые могут происходить под действием различных исходных факторов.

С одной стороны, после установления крупнейших полей базальтовых пород, образовавших равнины лунных морей, и детального изучения образцов лунных пород широкое развитие вулканических процессов на Луне установлено со всей определенностью. Также несомненна приуроченность жидких лавовых излияний к днищам многих крупных кратерных образований. С другой стороны, изучение морфологии кратерных форм позволяет утверждать их однотипное первичное происхождение в результате приповерхностного взрыва, что хорошо согласуется с метеоритной гипотезой. Процессы кальдерообразного опускания или выравнивания днища кратеров, как и заполнения их лавой, являются вторичными по отношению к возникновению основной формы. Следовательно, вопрос заключается именно в установлении генезиса кратерных взрывных форм рельефа, имеющих планетарное, глобальное развитие, и в выяснении их соотношений с проявлениями лунного вулканизма.

Как известно, на основании детального статистического изучения распределения кратеров по размеру и пространственному распространению, проводившегося как американскими [54, 74, 111], так и советскими [31, 38, 42, 44] исследователями, вся совокупность лунных кратеров от размеров в несколько микрон до сотен километров в диаметре объединяется в единый закономерный ряд. Кратеры распределены случайным образом на поверхности разных геологических формаций, причем плотность кратеров тем больше, чем больше возраст этих формаций. По распределению диаметров кратеров ряд соответствует распределению размеров метеоритных тел [21, 23, 104]. К сожалению, многие работы подобного рода обесцениваются

отсутствием анализа геологической обстановки района и неучетом возможного омоложения рельефа, и поэтому их выводы требуют поправок. Достаточно указать хотя бы на то, что, по нашим данным, только развитие склоновых процессов приводит к сокращению времени существования кратеров и уменьшению их числа в 5–8 раз на крутых склонах по сравнению с горизонтальной поверхностью. Твердо установлено, что наиболее мелкие члены этого непрерывного ряда (начиная от микрократеров на отдельных частицах лунного грунта и до кратеров диаметром в несколько километров) в большинстве случаев отношения к вулканизму не имеют и являются результатом ударного кратерообразования. В то же время совершенно правы те исследователи, которые указывают на следы многоэтапности в развитии отдельных крупных кратерных форм, на несоответствие количества лавового материала, заливающего днище кратера, процессу ударного кратерообразования и на признаки выплавления базальтовых расплавов со значительных глубин [28, 33, 37, 45, 50]. Попытки связать кратерообразование с явлениями вулканических взрывов по типу мааров, помимо противоречий со статистическими закономерностями, встречают и другие возражения. Дело в том, что кратерообразование на Луне идет непрерывно таким образом, что новые взрывные кратеры возникают повсеместно и случайно вне зависимости от геологического субстрата, что не соответствует типичной для вулканизма локализации процессов во времени и пространстве. Кроме того, для возникновения вулканического взрыва (эксплозивного извержения) необходима высокая газонасыщенность лавы при достаточной ее вязкости. Так, на Земле в лаве содержание летучих (главным образом воды и углекислого газа) должно превышать 1–2% по весу. Реальное содержание воды в земных лавах при взрывах составляет 4–5% по весу [25].

Основная подъемная сила магмы в приповерхностных условиях — газосодержание, и подъем ее совершается по принципу газ-лифта. При

этом лава на Земле доходит до вершины стратовулкана. На Луне уровень лавы, как правило, ниже уровня окружающей местности, что противоречит возможной газонасыщенности лавы и ее возможной эксплозивной активности, известно лишь несколько исключительных случаев кратеров типа Варгентин, где лава заливает кратер выше подошвы внешнего склона его вала. Прямое изучение лунных образцов указывает на кристаллизацию всех лунных пород в условиях резкого дефицита летучих компонентов. Ничтожное содержание углерода, практическое отсутствие гидратированных минералов, трехвалентного железа и недостаток других летучих соединений прямо говорит о высокой сухости лунной магмы. Важно отметить, что такая дегазированность типична для обоих главных типов лунных пород: как древних материковых, так и более молодых морских базальтов. Высокая железистость лунных базальтов и все геоморфологические наблюдения указывают на типичную для Луны низкую вязкость и высокую текучесть большинства лавовых излияний. Лавы спокойно растекаются по поверхности при незначительных углах наклона и способны заливать пространства пониженных участков рельефа при ведущем значении трещинных излияний.

Характерной особенностью лунного вулканизма следует признать спокойные излияния жидкой и ненасыщенной газами лавы, которая обладает ничтожной подъемной силой и проявляется только в самых низких уровнях рельефа. В подобных условиях можно ожидать эксплозивные извержения разве только гавайского типа, который никак не соответствует процессам глобального кратерообразования, типичного для поверхности Луны в целом. Вулканические аппараты центрального типа, с кратером, возникшим под воздействием чисто эндогенных факторов, в этих условиях следует искать среди мелких кратерочков на вершинах холмов (возможно, вдоль трещин среди цепочек кратеров) и в других четких проявлениях локального вулканизма, как, например,

лавового заполнения крупных ударных кратеров диаметром более 20–30 км типа днища Альфонса [20] . Примерами таких вулканических аппаратов считаются кратер Арат-СА в Море Ясности [72], D-Кальдера, которая находится на вершине пологого купола, сложенного материалами морского типа [64], шлаковые конуса в юго-восточной части Моря Ясности [103] и ряд подобных образований, описанных ранее, диаметр которых, по-видимому, не выходит за пределы первых километров. Это явление иного порядка.

Если мы откинем предвзятость мнений исследователей, в целом несомненно, что в явлении глобального кратерообразования мы находим систему разнородных признаков, которые указывают на два различных процесса, и надо четко разделять процесс самого взрывного ударного кратерообразования и процесс последующей эволюции возникшей формы. Последняя в небольших (менее 15–20 км) кратерах обычно идет только в направлении экзогенной деструкции, а в более крупных (более 20 км) в определенных геологических условиях закономерно связана с размерами кратера и системой трещин, возникших при его образовании. В разных случаях она проявляется в лавовых излияниях, кальдерообразной просадке или изостатическом выравнивании днища кратера. Стремление все объяснить одним процессом [2, 13, 33] и недоучет двойственности экзогенных и эндогенных явлений привели только к затянувшимся спорам о природе глобального кратерообразования.

Любопытно отметить методологические особенности из истории этого спора. Во-первых, исследователи, которые начали изучение Луны с обзорных материалов мелкого масштаба, неизменно отмечали последовательность и многоэтапность развития крупных форм и приходили к выводам об эндогенной природе рельефа [33, 45], а исследователи, которые начинали с детального изучения особенностей ударных кратеров по крупномасштабным изображениям [42, 55, 104],

уверенно распространяли полученные закономерности и на непрерывный ряд более крупных форм. И, во-вторых, если в начале детального изучения Луны казалось несомненным, что ударные кратеры преобладают только среди мелких форм, а заведомо эндогенные кратеры назывались среди крупнейших, то теперь выясняется, что поиски чисто вулканических кратеров следует проводить также и среди относительно мелких образований.

Наиболее удовлетворительной сейчас следует признать модель, по которой глобальное кратерообразование на планетных телах связано с ударно-взрывными процессами, интенсивность которых на ранней стадии развития планет солнечной системы, т. е. более 3,5–4,0 млрд. лет назад, резко отличалась от современной. В процессе взрывного кратерообразования образуются продукты взрыва, объем которых примерно равен объему кратера. При маломощных выбросах возникает рыхлый слой реголита, покрывающий всю поверхность Луны. Одноактные крупнейшие взрывы образуют спекающиеся продукты, представителями которых являются материковые брекчии. В результате множества взрывов разного масштаба горные породы, представленные на поверхности Луны, переотложены, т. е. являются в той или иной степени аллогенными. В то же время в зависимости от плотности энергии взрыва возникает определенный метаморфизм исходной породы, который может затрагивать как физические, так и химические свойства ее. Таким образом, процесс кратерообразования одновременно является особым литогенетическим процессом, и надо рассматривать кратерный морфолитогенез как единый процесс, имеющий важное значение в эволюции облика планеты.

Переходя к рассмотрению характера и роли разных процессов на протяжении геологической истории Луны, следует отметить, что стратиграфическая шкала Луны еще недостаточно унифицирована, и разные исследователи по-разному называют ее периоды и проводят их

границы, однако общий стратиграфический принцип достаточно единообразен [24]. Уже давно отмечено, что геологическая история Луны делится на три основных этапа развития, которые принципиально различаются по характеру ведущих процессов и могут называться геологическими эрами: это доморская, или материковая эра, морская (вулканическая) эра массовых излияний базальтовых лав на поверхность Луны и послеморская эра, которая практически смыкается с современной по условиям формирования поверхности [40, 43]. Дальнейшее разделение эр на геологические периоды не имеет принципиального характера и связано со временем образования отдельных, наиболее типичных форм лунного рельефа, которые и рассматриваются как стратотипы.

МАТЕРИКОВАЯ ЭРА

Продукты процессов материковой эры выходят на поверхность Луны на относительно светлых нагорьях материков, возвышающихся над более темными равнинами морей в среднем на 1–2 км. Породы, слагающие материки, в основном представлены брекчиями, состоящими из обломков в разной степени измененных магматических пород анортозит-норит-троктолитовой серии [5, 14, 35, 48, 99]. Обломочный характер материковых пород хорошо согласуется с особенностями рельефа материковой поверхности, которая «насыщена» кратерами диаметром более 50–100 км и многократно переработана кратерами меньшего размера [42, 43, 92, 104]. Изотопные определения говорят о том, что дифференциация вещества этих пород из гипотетического единого источника произошла примерно 4,5 млрд. лет назад (табл. 1), а образование брекчий, сопровождавшееся ударным метаморфизмом и разогревом, происходило не позже чем 3,9–4,1 млрд. лет назад (табл. 2). Таким образом, ведущими процессами формирования поверхности в доморскую эру были ранняя дифференциация с образованием

материковой коры и интенсивная кратерная переработка последней. Весьма вероятно, что эти процессы не только смыкались во времени, но были и генетически связаны.

Вещество материковых пород обладает существенно полевошпатовым (анортит в смеси с различными пропорциями оливина и ортопироксена) составом, т. е., по современным воззрениям, имеет резко выраженный непримитивный характер. Мощность материковой коры, судя по геофизическим данным, составляет 40–60 км [12, 110, 118]. Ниже расположена лунная мантия, в которой скорости сейсмических волн близки к таковым для верхней мантии Земли, что дает основания предполагать также и близость вещественного состава. Выделение такой мощной, существенно полевошпатовой коры из первичного вещества лунного тела требует, чтобы эта ранняя дифференциация затрагивала очень большие объемы первичных пород, т. е., по сути, имела бы планетарный масштаб.

Химический и минеральный состав материковых пород указывает на обедненность материковой коры Луны легколетучими компонентами, которая не ограничивается обычными газообразными соединениями, но и сочетается с низким содержанием в этих породах таких относительно летучих элементов, как К и Na и концентрацией таких элементов, как Са и Al, которые являются труднолетучими. Это, в свою очередь, указывает на потерю Луной легколетучих веществ на очень ранней (догеологической) стадии ее развития.

Дробление и ударный метаморфизм корового вещества, результировавшиеся в формировании мощного покрова материковых брекчий, тесно связаны с процессом кратерообразования. Об интенсивности этого процесса в доморскую эру свидетельствует тот факт, что общая плотность кратеров диаметром более 1 км на материках (возраст поверхности 4–4,5 млрд. лет) примерно в 30 раз выше, чем на морских равнинах, которые моложе материков всего на 0,5–1 млрд. лет

[73]. Следует также учитывать, что на материках поверхность «насыщена» этими кратерами, т. е. наблюдаемая здесь плотность кратеров, очевидно, представляет лишь часть существовавших здесь кратерных форм. Интересно отметить, что хотя кратерообразование — это процесс наиболее активный и важный в доморскую эру истории Луны, решающие морфологические данные получены на относительно молодых морфологически свежих образованиях типа кратеров Тихо и Коперник, и они распространяются на более древние кратерные формы, уже потерявшие большую часть морфологических признаков характера своего происхождения. Для свежих лунных кратеров (возраст которых, особенно для крупных форм, может быть достаточно велик) характерно, что морфология их тесно связана с размерами. Кратеры диаметром менее 10–15 км имеют, как правило, чашеобразную форму с четко выраженным валом, переходящим в покров выбросов, и по ряду признаков очень близки к воронкам от обычных и ядерных взрывов. С увеличением диаметра морфологические характеристики кратеров закономерно изменяются — кратеры становятся относительно менее глубокими (15–20 км), на днище появляется центральная горка (20–30 км) и, наконец, в интервале диаметров 150–200 км они переходят в категорию многокольцевых кратерных форм (бассейнов). При этом общий взрывной характер структуры сохраняется (четкие покровы выбросов, поля вторичных кратеров), и в целом подавляющее большинство кратеров Луны диаметром от долей метра до сотен километров образует единую последовательность форм.

Важным аргументом в пользу ударно-взрывного образования материковых брекчий является присутствие в их составе примеси древней метеоритной компоненты — повышенных (по сравнению с веществом малоизмененных обломков из этих же брекчий) концентраций специфических для метеоритного вещества сидерофильных элементов Ir, Au, Ge, Ni и др. [26]. Эти геохимические

признаки метеоритной бомбардировки сочетаются с равномерно-случайным (в пределах одновозрастных поверхностей), независимым от местной геологической ситуации характером распределения кратеров по площади. Таким образом, в свете новых данных, полученных в результате применения средств космической техники, материковая эра геологической истории Луны представляется как время дифференциации лунной коры и интенсивной метеоритной бомбардировки ее поверхности. Весьма привлекательна мысль о том, что эта бомбардировка является естественным продолжением процесса аккреции вещества допланетной стадии в планетные тела. Кульминацией процесса ранней бомбардировки явилось образование крупных многокольцевых бассейнов типа бассейна Моря Восточного или бассейна Моря Дождей. Близость значений возраста образцов брекчий, собранных в зонах влияния нескольких различных бассейнов (см. табл. 2) , приводит некоторых исследователей к представлениям об образовании большинства наблюдаемых бассейнов в единый относительно короткий промежуток времени [108, 109]. Вскоре после образования бассейна Моря Восточного интенсивность метеоритной бомбардировки резко упала, и Луна вступила в новую эру своей истории.

Оценка возраста дифференциации пород луны из гипотетического единого источника (возраст глобальной дифференциации Луны)

№ п/п	Исследованные породы, космический аппарата	Метод	Возраст, млрд. лет	Источник
1	Материковые анортозиты, нориты и все базальты (кроме высококалийевых «Аполлона-11»)	Rb–Sr изохрона	$4,5 \pm 0,2$	[56]
2	Низкокалийевые морские базальты «Аполлона-11, -12, -15»	Rb–Sr изохрона	~4,5 или 4,2–4,5	[60]
3	Базальты KREEP, высокоглиноземистые базальты и родственные им породы «Аполлона-15, -16»	Rb–Sr изохрона	4,1–4,5, вероятно, 4,25–4,45	[96]
4	Брекчии и кристаллические породы, «Аполлон-16»	U–Th–Pb	~4,47	[93]
5	«Ржавая» порода 66095, «Аполлон-16»	U–Th–Pb	~4,47	[94]
6	Дунит из брекчии, «Аполлон-17»	Rb–Sr внутренняя изохрона	$4,6 \pm 0,09$	[52]

Таблица 2

Типичные значения возраста материковых пород Луны (возраст ударного метаморфизма)

№ п/п	Район исследований, космический аппарат	Тип породы	Метод	Возраст, млрд. лет	Источник
1	Вал кратера Амегино на материковой возвышенности к северу от Моря Изобилия, «Луна-20»	Микробрекчии	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ K/Ar	3,9–4,0	[79, 116]
2	Холмистый район Фра Мауро, «Аполлон-14»	Обломки неморских базальтов из брекчий	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Pb/Sr	3,9–4,1	[115] [90]
3	Подножие гор Апеннины, «Аполлон-15»	Обломок из катаклазированного анортозита	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	3,9–4,1	[114]
4	Плато Декарт, «Аполлон-16»	Брекчии, обломки кристаллических пород из брекчий	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	3,85–4,1	[85, 102, 116]
5	Горы Тавр на Восточном побережье, Море Ясности, «Аполлон-17»	Брекчии и микробрекчии	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Pb/Sr U/Pb	3,9–4,1	[83, 84] [80] [95]
		Обломок троктолитового гранулита	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Pb/Sr	4,3–4,4*	[57]

* Вероятно, возраст кристаллизации.

МОРСКАЯ ЭРА

Основные проявления морской эры — второго крупнейшего этапа геологической истории Луны — представлены базальтовыми равнинами лунных морей. Лунные моря практически полностью сосредоточены на видимой стороне, что является одной из интереснейших загадок Луны. Они заполняют крупные депрессии лунной поверхности. В большинстве своем — это центральные части бассейнов, возникновение которых произошло на последней стадии материковой эры. Крупные кольцевые структуры (ударного типа) расположены на всей поверхности Луны в общем достаточно равномерно, в то время как их базальтовое заполнение сосредоточено на видимой стороне. Это подчеркивает независимость этих двух явлений и указывает на асимметричное расположение базальтовых магматических очагов Луны. Моря, насколько нам известно из изучения доставленных на Землю образцов и из данных орбитальных геохимических экспериментов [9, 22, 51], сложены железистыми базальтами, по общему химизму близкими примитивным толеитовым базальтам Земли. Суммарная мощность базальтового выполнения депрессий лунных морей, оцениваемая по степени затопления доморских кратеров, колеблется от нескольких сотен метров до 1–2 км [34, 61].

Существующая геофизическая интерпретация разрезов, полученных по сейсмическим данным, которая приписывает базальтовым излияниям мощность более 20 км [110], должна быть пересмотрена с учетом морфологического строения морей. Такая мощность базальтового слоя возможна лишь в отдельных участках поверхности и не может распространяться на все моря в среднем [49]. Более вероятно, что устанавливаемый по сейсмическим данным слой мощностью около 20 км соответствует верхнему трещиноватому слою лунной коры, связанному с ударным кратерообразованием. Возможно,

что под полузатопленным древним рельефом, следы которого прослеживаются на поверхности, находится древняя кора Луны материкового типа, пронизанная базальтовыми материалами по трещинам. В таком случае масконы должны соответствовать проплавленным насквозь участкам погребенной коры.

Морские базальты не комплементарны материковым породам анортозит-норит-троктолитовой серии, что свидетельствует об образовании их, вероятно, в результате дифференциации глубинного мантийного материала Луны [22]. В отличие от материковых пород, морские базальты в целом не подверглись интенсивному ударному метаморфизму и сохранили свои первичные магматогенные структуры. Морские базальты, подобно материковым породам, характеризуются крайне низким содержанием летучих компонентов, что находит также отражение в составе минералов, слагающих зги породы. Так, например, характерное для них ничтожно малое содержание окисного железа прямо свидетельствует о высокой сухости магмы в момент кристаллизации. Известно несколько образцов лунных базальтов с высокой пористостью (до 40%), но и в этом случае газосодержание магмы, вероятно, не превышало долей процента по весу. В то же время особенности общего химического состава базальтов и в первую очередь их высокая железистость определяют весьма низкую вязкость базальтовой лавы. Об этом свидетельствует также и морфология базальтовых потоков лунных морей, заполняющих понижения рельефа и способных течь при уклонах менее 1° [101].

Спокойный характер излияний лунных базальтовых лав находит свое выражение в морфологии морских равнин. Здесь развит целый комплекс вулканогенных форм рельефа. На снимках наиболее молодых участков лунных морей дешифрируются лавовые потоки и питающие их вулканические аппараты трещинного типа. Иногда наблюдаются шлаковые конуса с вершинными кратерами [91, 103]. Характерными

формами рельефа лунных морей являются борозды (особенно извилистые борозды, начинающиеся в редких кратерах невзрывного типа) и так называемые морские гряды [32, 36, 70, 77, 107]. Детали генезиса этих форм рельефа еще не до конца понятны, но связь их с вулканизмом и сопровождающей его тектонической активностью морской эры несомненна.

Общая тектоническая активность Луны, крайне низкая в настоящее время [87], очевидно, в прошлом была значительно выше и проявляется системой разломов, среди которых, по-видимому, можно выделить два основных типа: радиальные и концентрические разломы, связанные с отдельными кольцевыми структурами, и общепланетарная система разломов, которую часто связывают с изменением ротационного режима Луны и приливными явлениями [46]. Возможно, что эта система развивается путем объединения более мелких трещин, возникших при образовании ударных структур. Время возникновения и развития трещин многоэтапно, но надежность их установления, конечно, повышается на участках более простого строения поверхности.

Образование базальтов лунных морей датируется по данным определения возраста доставленных на Землю образцов Rb–Sr и K–Ar методами 3,8–3,2 млрд. лет назад (табл. 3). Изучение снимков лунной поверхности позволяет предполагать, что проявления базальтового вулканизма в более слабой степени могли иметь место примерно до 2,5–2,0 млрд. лет назад [58, 101]. Излияния базальтовых лав в морях носили многоэтапный характер, и обычно в пределах одной морской равнины выделяется несколько разновозрастных поверхностей, отличающихся насыщенностью кратерами, альбедо и тектонической нарушенностью. Наиболее древние морские поверхности характерны для некольцевых морей восточного полушария Луны, наиболее молодые — для морских равнин западного полушария [58].

Важной особенностью геологии Луны является разрыв во времени между образованием структуры, вмещающей море (в ясных случаях это ударные бассейны), и заполнением ее базальтами морского типа. Существование такого разрыва следует из различий в величине плотности кратеров, наложенных на материковые элементы бассейнов и их морское заполнение [71], и подтверждается определениями абсолютного возраста образцов. Этот разрыв, судя по имеющимся сейчас данным, колеблется от 0,3 млрд. лет (Море Ясности) до 0,8–1 млрд. лет (Море Дождей; см. табл. 2 и 3) . Этот факт указывает на отсутствие прямой связи между ударно-взрывным явлением, приведшим к образованию бассейна, и вулканическим процессом, приведшим к заполнению его. Впрочем, нельзя полностью исключать того, что мощное ударное событие может оказывать влияние на течение эндогенных процессов в последующие этапы и что приуроченность морей к бассейнам контролируется не только высотным положением заливаемой поверхности в рельефе.

В целом на современном уровне нашего понимания истории Луны представляется, что интенсивная вулканическая деятельность здесь была ограничена довольно узким интервалом времени порядка 1 млрд. лет. В дальнейшем роль магматических процессов стала уменьшаться и на Луне наступила эра господства экзогенных процессов.

Таблица 3

Типичные значения возраста морских пород Луны (возраст кристаллизации)

№ п/п	Район исследований, космический аппарат	Тип породы	Метод	Возраст, млрд. лет	Источник
1	Восточная часть Океана Бурь — Море Познанное, «Аполлон-12»	Базальты с низким содержанием титана	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	3,1–3,2	[106, 113]
2	Болото Гниения — залив Моря Дождей у подножья гор Апенникны, «Аполлон-15»	То же	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ K–Ar Pb–Sr	3,2–3,3	[106] [97] [66]
3	Море Изобилия, «Луна-16»	То же	Pb–Sr K–Ar	3,4–3,5	[8] [78]
4	Море Спокойствия, «Аполлон-11»	Базальты с высоким содержанием титана	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	3,6–3,8	[112, 113]
5	Долина Литтров Тавр — Залив Моря Ясности, «Аполлон-17»	То же	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Pb–Sr	3,7–3,8	[80, 116] [66]

ПОСЛЕМОРСКАЯ ЭРА

Образования послеморского этапа эволюции лунной поверхности представлены в основном ударно-взрывными кратерами и коррелятными им отложениями — чехлом реголита. Они развиты повсеместно, но для их изучения наиболее благоприятны равнины лунных морей, где послеморские и предшествующие им образования хорошо отличаются друг от друга. Кратеры послеморской эры иногда довольно велики (диаметр кратера Коперник около 90 км), но основной эффект послеморской переработки лунной поверхности вызван совокупным воздействием малых кратерных форм, диаметры которых обычно не превосходят десятков и нескольких сотен метров. Малые кратеры в течение послеморской эры перенакладывались друг на друга, в результате чего поверхность подверглась многократной ударно-взрывной переработке и приобрела характерный кратерный облик. Обилие послеморских кратеров может создать иллюзию высокой интенсивности послеморского кратерообразующего процесса, хотя истинная причина этого явления состоит в медленности процессов разрушения кратеров на Луне.

Оценка возраста ряда конкретных кратеров по времени экспозиции (на лунной поверхности) выбросов из них в сочетании с анализом морфологических особенностей этих кратеров приводит к заключению о необычно большой (по сравнению с земными образованиями) потенциальной продолжительности существования лунных кратеров в послеморское время [1, 41]. Кратеры диаметром в несколько метров способны противостоять действию разрушающих факторов миллионы лет, а время потенциального существования кратеров поперечником в несколько сотен метров сравнимо с продолжительностью всей послеморской эры (2–3 млрд. лет). Эти данные хорошо согласуются с оценками средней интенсивности

метеоритной бомбардировки в послеморскую эру, которые оказались весьма невелики [71, 104] и сравнимы с современной интенсивностью метеоритных выпадений, измеренной с помощью прямых методов наблюдений [27, 53, 63].

Длительность существования лунных кратеров в послеморскую эру прямо указывает на низкую интенсивность процессов переработки поверхности. Среди факторов, вызывающих эту переработку, по своему значению выделяется комплекс ударно-взрывных явлений, связанных с метеоритной бомбардировкой поверхности, и явления перемещения вещества реголита вниз по склонам лунного рельефа под воздействием силы тяжести — обвалы, осыпи, оползни и медленное перемещение типа крипа или десерпции. Значение метеоритной бомбардировки в переработке поверхности осознано исследователями достаточно давно [30, 69] и хорошо иллюстрируется общим ударно-взрывным характером послеморского рельефа. Роль склоновых процессов начала проясняться сравнительно недавно в результате детальных геоморфологических исследований, в частности в работах, проведенных с помощью «Лунохода-1» и «Лунохода-2» [43]. Интересно отметить, что ударно-взрывные процессы и часть склоновых процессов (обвалы, оползни, осыпание) являются относительно быстропротекающими — геологически мгновенными, но из-за малой частоты реализации этих явлений их накопленная эффективность невелика.

На морях результатом послеморской переработки пород поверхности является реголит — рыхлый покров обломочного материала, включающий обломки любых размеров, смещенные с места своего первоначального залегания [43]. Мощность реголитового чехла определяется временем действия и интенсивностью экзогенных факторов, а также характером рельефа данного района. Для равнин лунных морей она оценивается величиной порядка 3–10 м. Для материковых поверхностей, где процесс реголитообразования

действовал уже и в доморскую и морскую эру и продолжал свою работу в послеморскую эру, мощность реголита выше и в зонах подсклоновых шлейфов, вероятно, может достигать первых десятков метров. Состав реголита определяется главным образом составом подстилающих коренных пород, но на него может оказывать большое влияние комплекс процессов, связанных с метеоритной бомбардировкой поверхности. Основными факторами формирования литологического состава реголита являются: дробление первичных и вновь образующихся вторичных пород поверхности, ударный разогрев, вызывающий плавление и спекание вещества и приводящий к образованию вторичных частиц, а также горизонтальный разброс вещества и его вертикальное перемешивание. Интенсивность процессов видоизменения реголита, его зрелость, заметно уменьшается сверху вниз соответственно преобладанию эффектов от микрометеоритных ударов в верхней части разреза. Перемешивание реголита, возникающее при этом, приводит к тому, что на одной и той же глубине встречаются частицы, имеющие резко различный экспозиционный возраст, который колеблется от 1 до 1000 млн. лет (табл. 4).

Валовый химический состав реголита в основном контролируется теми же процессами переработки поверхности. На более тонкие особенности состава реголита, кроме того, оказывают влияние добавление внелунного вещества и процессы испарения и конденсации. В отношении ряда микроэлементов геохимическая характеристика реголита в большой степени определяется поступлением их из космического пространства. Выделяются две совокупности процессов такого типа. Длительное воздействие на поверхностный слой солнечного и галактического излучения вызывает обогащение реголита водородом, инертными газами, углеродом и некоторыми другими элементами [65, 76, 117]. Метеоритная и кометная бомбардировка лунной поверхности ответственна за обогащение реголита некоторыми характерными, в

первую очередь сидерофильными (Ni, Au, платиноиды и др.) элементами, которыми коренные лунные породы в целом обеднены по сравнению со средним составом хондритов [16, 26, 88].

Одной из характерных химических особенностей лунного реголита является более низкое содержание в нем в целом и особенно в его вторичных компонентах — стеклах, агглютинатах и т. д. (по сравнению с первичными кристаллическими породами) калия, натрия и некоторых других относительно легколетучих элементов. Этот хорошо известный сейчас факт практически однозначно рассматривается исследователями как результат фракционного испарения элементов при ударных взрывных процессах. С этим же процессом фракционного испарения могут быть связаны аномальные значения модельного возраста реголита [68]. Однако процесс фракционного испарения на поверхности Луны захватывает не только относительно легколетучие элементы типа щелочей, но и основные петрогенные элементы, в первую очередь — железо и кремний [15, 62]. Процесс потери основных петрогенных элементов при испарении наиболее четко фиксируется для части материкового реголита в силу особенностей его химического состава (в первую очередь низкой железистости), однако известен и для морских базальтовых пород. Локальная интенсивность этого процесса может быть весьма велика: в ряде случаев для отдельных вторичных частиц потери SiO_2 , по отношению к первоначальному содержанию этого компонента, превышают 30%. Широкое развитие процесса фракционного испарения элементов при образовании реголита накладывает серьезные петрохимические ограничения при интерпретации происхождения слагающих его частиц.

Одновременно с процессом испарения на Луне существует и противоположный ему процесс конденсации элементов из образовавшегося при взрыве облака пара. Он фиксируется, в частности, по обогащению поверхности ряда частиц (в первую очередь

сферических частиц) щелочами, железом и кремнием [17, 86], т. е. теми компонентами, которые претерпевают существенное испарение. Масштаб процесса конденсации в настоящее время еще недостаточно ясен, но ряд фактов, и в первую очередь отмеченная уже обедненность реголита щелочными элементами, позволяет считать эффективность процесса конденсации меньшей, чем процесса испарения, и заметное количество испарившихся элементов, вероятно, теряется Луной в космическое пространство.

Таблица 4

Возраст некоторых послеморских образований на лунной поверхности

№ п/п	Район	Датируемые образования	Тип возраста	Возраст, млн. лет	Источник
		К р а т е р ы			
1	Океан Бурь	Кратер Коперник ($D \sim 90$ км), крутосклонный, с четкой лучевой системой выбросов	Время застывания продуктов ударного плавления в выбросах	850	[105]
2	Долина Литтров Тавр	Кратер Камелот ($D \sim 730$ м), крутосклонный, с хорошо выраженным валом	Возраст экспозиции выбросов	85	[84]
3	Плато Декарт	Кратер Саут Рэй ($D \sim 650$ м), крутосклонный, с многолучевой зоной каменистых выбросов	То же	2	[89]
4	То же	Кратер Плам ($D \sim 30$ м), со склонами умеренной крутизны, камней на валу мало	»	30	[67]
5	Болото Гниения	Безымянный кратер с крутосклонной, первично комковатой поверхностью вала ($D \sim 15$ м)	»	0,75	[100]
		Р е г о л и т			
6	Море Изобилия	Разные частицы морского реголита из колонки грунта, доставленной «Луной-16» (0–25 см от поверхности)	Возраст экспозиции	1–1000	[18, 19, 47]
7	Вал кратера Амегино	Разные частицы материкового реголита из колонки грунта, доставленной «Луной-20» (0–20 см от поверхности)	» »	1–1000	[59, 75, 98]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, среди ведущих геологических процессов формирования поверхности Луны следует отметить как ударно-взрывное кратерирование, так и эндогенный вулканизм. Относительная роль этих процессов менялась в разное время. Однако особенности лунного вулканизма надо видеть отнюдь не в колоссальных эксплозиях, сопровождающих дегазацию Луны, а наоборот, в множественных и спокойных излияниях лав, заполнивших понижения рельефа по ранее образованной системе трещин, по которым и происходили блоковые тектонические движения, осложняющие видимую структуру ударных кратеров. Базальтовые излияния, приуроченные к морской эре, перекрывают древний кратерный рельеф лейкократовой материковой коры слоем в 1–2 км. Исключение составляют области срединных участков круговых морей, т. е. масконов, где мощность морских лав не определяется по морфологическим признакам. Дисимметрия лунного шара характеризуется именно этими базальтовыми излияниями, а не первичной группировкой ударных бассейнов, т. е. связана с внутренней, а не с внешней неоднородностью Луны.

Спокойный характер лунного вулканизма может служить дополнительным указанием на незначительную роль первично-ювенильной воды при извержениях земных вулканов, где основная доля воды связана с водой, погребенной в процессе геохимического кругооборота вещества. Возможно, что именно вследствие отсутствия такого кругооборота на Луне магматическая деятельность ее сошла на нет в послеморскую эру, в то время как на Земле, пройдя максимум, по видимому, где-то в архее, продолжается до сих пор.

Важной особенностью базальтовых лав Луны следует считать отсутствие какого-либо господствующего уровня их поверхности [11,

82], что говорит о слабой гидравлической связи очагов отдельных излияний и усиливает позиции гипотезы зонального плавления Луны.

В то же время следует подчеркнуть, что общее значение ударно-кратерного морфолитогенеза явно недооценивается. Представляется интересным еще раз вкратце рассмотреть некоторые аспекты этого экзогенного процесса и соотношение его с эндогенными факторами формирования лунной поверхности.

Выше уже отмечалось значение связанного с метеоритной бомбардировкой процесса фракционного испарения при формировании реголита [81]. Степень разделения вещества при рассматриваемом процессе есть функция интенсивности бомбардировки, которая была несравненно выше в доморскую эру, возможно, непосредственно сливаясь с окончанием процесса аккреции. Один из нас уже указывал на значение этого процесса в дифференциации вещества на конечной стадии аккреции [39]. Сейчас выясняется, что роль метеоритной бомбардировки может быть еще более важной. Мы представляем себе этот процесс следующим образом. В формировании планеты из пылевого облака можно выделить две стадии. Первая из них является собственно аккрецией, т. е. слипанием отдельных частиц в отдельные тела, которые, находясь под влиянием противоположно направленных сил тяготения роя частиц, сливаются, сталкиваясь на малых скоростях, притягиваемые более крупным зародышем планеты. Так может образоваться основная масса планеты. По мере исчерпания протопланетного роя [29], увеличения массы центрального тела и расстояния, с которого прилегают мелкие тела, увеличивается энергия их ударов. Период первоначальной аккреции планетных тел неизбежно заканчивается мощной метеоритной бомбардировкой, под влиянием которой складывается строение коры небесного тела. При этом в ударных взрывах происходит частичная дегазация, плавление и испарение падающих тел. Если рост планетного тела происходит

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

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

Рассматривая пример Земли и Луны, мы видим, как один и тот же процесс в зависимости от характера своего развития привел к накоплению легколетучих элементов в земной коре и, наоборот, к накоплению труднолетучих компонентов в реголите Луны. Многие современные гипотезы связывают наблюдающийся для Луны дефицит легколетучих компонентов с образованием Луны из тел, уже обедненных этими компонентами. Мы полагаем, что рассматриваемый здесь процесс фракционной перекоденсации также играл важную роль

при формировании химизма верхних оболочек Луны и его влияние должно учитываться при реконструкциях ранней истории планет. Пока неясно, в какой степени подобные процессы могут быть ответственны за полноту наблюдаемых эффектов, но представляется несомненным, что они должны были наложить свой отпечаток на состав коры планет земного типа, в том числе и образование первичной анортозитовой коры Луны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Базилевский А.Т.* Возраст малых лунных кратеров. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1974, №8, с. 139–142.
2. *Бонев И.* О вулканизме на Луне. — В кн.: Новое о Луне. М.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 196.
3. *Виноградов А.П.* К происхождению лунных пород. — Геохимия, 1970, №1, с. 3–13.
4. *Виноградов А.П.* Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-16». — Геохимия, 1971, №3, с. 261–274.
5. *Виноградов А.П.* Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-20». — Геохимия, 1972, №7, с. 763–774.
6. *Виноградов А.П.* О генезисе реголита Луны. — В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974, с. 348–355.
7. *Виноградов А.П.* Дифференциация вещества Луны. — В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975, с. 5–28.
8. *Виноградов А.П., Артемов Ю.М.* Абсолютный возраст материала лунного реголита из Моря Изобилия. — В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974, с. 454–467.
9. *Виноградов А.П., Сурков Ю.А., Чернов Г.М., Курнозов Ф.Ф., Назаркина Г.Б.* Измерения гамма-излучения лунной поверхности на космической станции «Луна-10». — Геохимия, 1966, №8, с. 891–899.
10. *Виноградов А.П., Сурков Ю.А., Флоренский К.П., Черкасов И.И., Шварев В.В.* Исследование лунной поверхности на советских автоматических

- станциях «Луна-9» и «Луна-13». — В кн.: Физика Луны и планет. М.: Наука, 1972, с. 25–30.
11. *Гаврилов И.В.* Гипсометрическая кривая Луны. — В кн.: Физика Луны и планет. М.: Наука. 1972, с. 184–186.
 12. *Галкин И.Н.* Строение и сейсмичность Луны. — Геология и геофизика, 1974, №11, с. 3–22.
 13. *Грин Дж.* Геологические науки в применении к исследованиям Луны. — В кн.: Новое о Луне. М.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 126.
 14. *Джеймс О.* Лунные материковые брекчии, образовавшиеся при главных ударных явлениях. — В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975, с. 500–517.
 15. *Иванов А.В.* Роль испарения в формировании химического состава лунных стекол. — Геохимия, 1975, №8, с. 1150–1155.
 16. *Иванов А.В., Флоренский К.П., Стахеев Ю.И.* Метеоритное вещество в поверхностных слоях Луны. — Метеоритика, 1974, вып. 33, с. 73–78.
 17. *Иванов А.В., Флоренский К.П., Назаров М.А., Шевалеевский И.Д.* Некоторые проявления процессов испарения и конденсации при образовании частиц лунного реголита. — Докл. АН СССР, 1975, 221, №2, с. 202–205.
 18. *Кайзер В.А.* Изучение редких газов в образце реголита «Луны-16» методом ступенчатого нагревания. — В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974, с. 394–404.
 19. *Кашкаров Л.Л., Лаврухина А.К., Генаева Л.И.* Некоторые результаты исследования трековым методом лунного вещества, доставленного автоматической станцией «Луна-16». — В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974, с. 421–426.
 20. *Козырев Н.А.* Спектральные доказательства существования вулканических процессов на Луне. — В кн.: Новое о Луне. М.: Изд-во АН СССР, 1963, с. 199–208.
 21. *Леонтьев Л.В., Тарасов А.В., Терешкин Л.А.* Некоторые особенности распределения космической пыли. — Космические исследования, 1971, 9, вып. 4.
 22. Лунный грунт из Моря Изобилия. /Под ред. А.П.Виноградова. М.: Наука, 1974.

23. *Мазец Е.Л.* Микрометеороиды в космическом пространстве. — В кн.: Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве. М.: Наука, 1973, с. 13–22.
24. *Марков М.С., Суханов А.Л., Трифонов В.Г., Флоренский П.В., Шкерин Л.М.* Геологическое картирование Луны. — В кн.: Современные представления о Луне. М.: Наука, 1972, с. 65–87.
25. *Мархинин Е.К.* Роль вулканизма в формировании земной коры. М.: Наука, 1967.
26. *Морган Дж.В., Ганапати Р., Хигачи Х., Андерс Э.* Метеоритное вещество на Луне. — В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975, с. 518–541.
27. *Назарова Т.Н.* Микрометеоритное вещество вблизи Земли. — В кн.: Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве. М.: Наука, 1973, с. 8–13.
28. Проблемы геологии Луны. М.: Наука, 1969.
29. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969.
30. *Станюкович К.П., Бронштэн В.А.* Роль внешних факторов в эволюции Луны. — В кн.: Луна. М.: Физматгиз, 1969, с. 299–328.
31. *Суханов А.Л.* Некоторые особенности мелких кратеров Луны. — В кн.: Проблемы геологии Луны. (Труды ГИН АН СССР; Вып. 204). 1969, с. 188–205.
32. *Суханов А.Л.* Вулканические гребни на Луне. — В кн.: Проблемы геологии Луны. (Труды ГИН АН СССР; Вып. 204). 1969, с. 244–261.
33. *Суханов А.Л.* Вулканические формы на Луне. — В кн.: Вулканизм и тектоника Луны. (Труды ГИН АН СССР; Вып. 262). 1974, с. 7–173.
34. *Суханов А.Л., Шкерин Л.М.* О мощности пород процелляриевого комплекса. — В кн.: Проблемы геологии Луны. (Труды ГИН АН СССР), 1969, с. 37–45.
35. *Тарасов Л.С., Флоренский К.П., Иванов А.В., Родэ О.Д.* Морфологические особенности и типы частиц реголита, доставленного автоматической станцией «Луна-20» из материкового района Луны. — Геохимия, 1973, №9, с. 1275–1286.
36. *Трифонов В.Г.* Сравнение форм лунного рельефа с земными вулканическими образованиями. — В кн.: Проблемы геологии Луны. (Труды ГИН АН СССР; Вып. 204). 1969, с. 229–243.
37. *Трифонов В.Г.* Геология лунных морских впадин. — В кн.: Вулканизм и тектоника Луны. (Труды ГИН АН СССР; Вып. 262). 1974, с. 174–247.
38. *Тюрк Г.Г.* Статистика кольцевых форм лунной поверхности. — Русский астроном. журнал, 1924, 1, вып. 3–4.

39. *Флоренский К.П.* О начальном этапе дифференциации вещества Земли. — *Геохимия*, 1965, №8, с. 909–917.
40. *Флоренский К.П.* Луна необходима геологам. — В кн.: *Земля и люди*. М.: Мысль, 1972, с. 60.
41. *Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Гребенник Н.Н.* Морфологическая зрелость лунных кратеров как функция их возраста и размеров. — *Космические исследования*, 1971, IX, вып. 3.
42. *Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Гуриштейн А.А., Зезин Р.Б., Пронин А.А., Полосухин В.П., Попова З.В., Таборко И.М.* К проблеме строения поверхности лунных морей. — В кн.: *Современные представления о Луне*. М.: Наука, 1972, с. 21–45.
43. *Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Иванов А.В.* Роль экзогенных факторов в формировании лунной поверхности. — В кн.: *Космохимия Луны и планет*. М.: Наука, 1975, с. 439–452.
44. *Флоренский П.В., Забелин Е.И., Мочалов С.В., Пименов Ю.Г.* Неравномерное распределение кольцевых структур Луны по их диаметрам. — В кн.: *Проблемы геологии Луны*. (Труды ГИН АН СССР: Вып. 204). 1969, с. 206–228.
45. *Хабаков А.В.* Об основных вопросах истории развития поверхности Луны. — *Зап. Всесоюз. общества. Нов. сер.* 1949, 6.
46. *Хабаков А.В.* Характерные особенности рельефа Луны. Основные проблемы генезиса и последовательности развития лунных формаций. — В кн.: *Луна*. М.: Физматгиз, 1960, с. 241–298.
47. *Хейманн Д., Йанив А., Лакатос С.* Инертные газы в двенадцати частичках и одном образце «пыли» из пробы «Луны-16». — В кн.: *Лунный грунт из Моря Изобилия*. М.: Наука, 1974, с. 387–393.
48. *Хейс Дж.Ф., Уолкер Д.* Изверженные лунные породы и природа недр Луны. — В кн.: *Космохимия Луны и планет*, М.: Наука, 1975, с. 275–282.
49. *Хэб Дж.В.* Некоторые геологические наблюдения, касающиеся геофизических моделей Луны. — В кн.: *Космохимия Луны и планет*. М.: Наука, 1975, с. 574–584.
50. *Штейнберг Г.Д.* О происхождении крупных лунных кратеров и круглых морей. — *Докл АН СССР*, 1969, 184, №3.
51. *Adler J., Trombka J.I., Schmadebeck R., Lowman P., Blodget H., Yin L., Eller E., Podwysocki M., Weidner J.R., Bickel A.L., Lum R.V.L., Gerard J., Gorenstein P.,*

- Bjorkholm P., Harris B.* Result of the Apollo 15 and 16 X-ray experiment. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 3, p. 2783–2791.
52. *Albee A.L., Chodos A.A., Dymek R.F., Gancarz A.J., Goldman D.S., Papanastassiou D.A., Wasserburg G.J.* Dunite from the lunar highlands: petrography, deformational history, Rb–Sr age. — In: Lunar Science-V, Houston, Lunar Science Institute, 1974, p. 3–6.
53. *Alexander W.M., Arthur C.W., Bohn G.L., Smith G.C.* Four years of dust particle measurements in cislunar and selenocentric space from Lunar Explour 35 and OGO-3. — In: Space Research-XIII, Berlin, Akademie Verlag, 1973, p. 1037–1046.
54. *Baldwin R.B.* The measure of the Moon. Chicago, Univ. of Chicago Press, 1963, p. 488.
55. *Baldwin R.B.* On the history of lunar impact cratering: The absolute time scale and the origin of planetesimals. — *Icarus*, 1971, 14, N 1. p. 36–52.
56. *Birck J.L., Allegre C.J.* Constraints imposed by ^{87}Rb – ^{87}Sr on lunar processes and on the composition of the lunar mantle. — In: Lunar Science-V, Houston, Lunar Science Institute, 1974, p. 64–65.
57. *Bogard D.D., Nyquist L.E.* 76535: an old lunar rock? — In: Lunar Science-V, Houston, Lunar Science Institute, p. 1974.
58. *Boyce J.M., Dial A.L., Soderblom L.A.* Relative ages of lunar nearside plains. — In: Lunar Science-V, Houston, Lunar Science Institute, 1974, p. 82–84.
59. *Compston G.M., Fleisher R.L., Hart H.R.* Particle track record of the Luna mission. — *The Moon*, 1973, 7, N 1–2.
60. *Compston W.* REE trends and Rb–Sr model ages in mare basalts. — In: Lunar Science-V, Houston, Lunar Science Institute, 1974, p. 135–137.
61. *De Hon R.A.* Thickness of mare material in the Tranquilitatis and Nectaris basins. — In: Lunar Science-V, Houston, Lunar Science Institute, 1974, p. 163–164.
62. *Dowty E., Keil K., Prinz M.* Major-element vapor fractionation on the lunar surface: an unusual lithic fragment from the Luna-20 fines. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1973, 21, N 1, p. 91–96.
63. *Duennbier F., Sutton G.H.* Meteoroid impact by short-period component of Apollo 14 lunar passive seismic station. — *J. Geophys. Res.*, 1974, 79, N 29, p. 4365–4374.
64. *El-Baz F.* D-Caldera: new photographs of a unique feature. — In: Apollo 17 Prelim. Sci. Rept., NASA SP-330, 1973, p. 30–13 to 30–17.

65. *Epstein F., Taylor H.P., Jr.* The isotopic composition and concentration of water, hydrogen, and carbon in some Apollo 15 and 16 soils and in the Apollo 17 orange soil. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf. 1973, 2, p. 1559–1575.
66. *Evensen N.M., Murthy V.R., Coscio M.R., Jr.* Rb–Sr ages of some mare basalts and isotopic and trace element systematics in lunar fines. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 2, p. 1707–1724.
67. *Fleisher R.L., Hart H.R., Jr.* Particle track record of Apollo 16 rocks from Plum crater. — J. Geophys. Res., 1974, 79, N 5, p. 766–768.
68. *Gibson E.K., Jr., Hubbard N.J., Wiesmann H., Bansal B.M., Moore G.W.* How to lose Rb, K, and change the K/Rb ratio: an experimental study. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 2, p. 1263–1273.
69. *Gilbert G.K.* The Moon's face a study of the origin of its features. — Philos. Soc. Washington Bull., 1893, 12, p. 241–292.
70. *Gornitz V.* The origin of sinuous rilles. — The Moon, 1973, N 3/4, p. 337–356.
71. *Gornitz V.* Igneous vs impact processes for the origin of the mare lavas. — The Moon, 1973, 6, N 3/4, p. 357–379.
72. *Greeley R.* Comparative geology of crater Aratus CA (Mare Serenitatis) and Bear Crater (idaho). — In: Apollo 17 Prelim. Sci. Rept., NASA SP-330, 1973, p. 30–1 to 30–6.
73. *Hartmann W.K.* Early lunar cratering. — Icarus, 1966, 5, N 4, p. 406–418.
74. *Hartmann W.K.* Lunar crater counts. — Commun. Lunar and Planet. Lab., Univ. Arizona, 1967, 6, N 3; 1968, 7, N 3.
75. *Heymann D., Lakatos S., Walton S.R.* Inert gases in a terra sample: measurement in six grain-size fractions and two single particles from Luna 20. — Geochim. Cosmochim. Acta, 1973, 37, N 4.
76. *Hintenberger H., Weber H.W.* Trapped rare gases in lunar fines and breccias. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 2, p. 2003–2019.
77. *Hodges C.A.* Mare ridges and lava lakes. — In: Apollo 17 Prelim. Science Report NASA SP-330, 1973, p. 31–12 to 31–21.
78. *Huneke J.C., Podocek F.A., Wasserburg G.I.* Gas retention and cosmic ray exposure ages of a basalt fragment from Mare Fecunditatis. — Earth Planet Sci. Lett., 1972, 13, N 2, p. 375–383.
79. *Huneke J.C., Podocek F.A., Wasserburg G.J.* An argon bouillabaisse including ages from the Luna 20 site. — In: Lunar Science-IV, Houston, Lunar Science Institute, 1973, p. 403–405.

80. *Huneke J.C., Jessberger B.K., Podocek F.A., Wasserburg G.J.* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ measurements in Apollo 16 and 17 samples and the chronology of metamorphic and volcanic activity in the Taurus Littrow region. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 2, p. 1725–1756.
81. *Ivanov A.V., Florensky K.P.* The role of vaporization processes in lunar rock formation. — In: Proc. Sixth Lunar Sci. Conf., 1975, 2.
82. *Kaula W.M., Schubert G., Lingenfelter R.E., Sjogren W.L., Wollenhaupt W.R.* Lunar topography from Apollo 15 and 16 laser altimetry. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 3, p. 2811–2819.
83. *Kirsten T., Horn P., Heymann D.* Chronology of the Taurus-Littrow region I: Ages of two major rock types from the Apollo 17 site. — Earth Planet. Sci. Lett., 1973, 20, N 1, p. 125–130.
84. *Kirsten T., Horn P., Heymann D., Hubner W., Storzer D.* Apollo 17 crystalline rocks and soils: rare gases, ion tracks, and ages. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1973, 54, N 6, p. 595–596.
85. *Kirsten T., Horn P., Kiko J.* ^{39}Ar – ^{40}Ar dating and rare gas analysis of Apollo 16 rocks and soils. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 2, p. 1757–1784.
86. *Kurat G., Key K.* Effect of vaporization and condensation on Apollo 11 glass spherules: Implications for cooling rates. — Earth Planet. Sci. Lett., 1972, 14, N 1, p. 7–13.
87. *Latham G., Dorman J., Duennebier F., Ewing M., Lammlein D., Nakamura Y.* Moonquakes, meteoroids, and the state of the lunar interior. — Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 3, p. 2515–2527.
88. *Laul J.C., Morgan J.W., Ganapathy R., Anders E.* Meteorite material in lunar samples: characterization from trace elements. — In: Proc. Second Lunar Sci. Conf., 1971, 2, p. 1139–1158.
89. SAPT Fourth Lunar Science Conference. — Science, 1973, 181, N 4100, p. 615–622.
90. *Mark R.K., Cliff R.A., Lee-Hu C., Wetherill G.W.* Rb–Sr studies of lunar breccias and soils. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 2, p. 1785–1795.
91. *McGetchin T.R., Head J.W.* Lunar cinder zones. — Science, 1973, 180, N 4081, p. 68–71.
92. *Mutch T.A.* Geology of the Moon, a stratigraphic view. Princeton, N.Y., Princeton Univ. Press, 1970, 324.

93. *Nunes P.D., Tatsumoto M.* Excess lead in Rusty Pock 66095 and implications for an early lunar differentiation. — *Science*, 1973, 182, N 4115, p. 916–920.
94. *Nunes P.D., Tatsumoto M., Knight R.J., Unruh D.M., Doe B.R.* U–Th–Pb systematics of some Apollo 16 lunar samples. — In: *Proc. Fourth Lunar Sci. Conf.*, 1973, 2, p. 1797–1795.
95. *Nunes P.O., Tatsumoto M., Unruh O.M.* U–Th–Pb and Rb–Sr systematics of Apollo 17 boulder 7 from the North Massif of the Taurus-Littrow Valley. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1974, 23, N 3, p. 445–452.
96. *Nyquist L.E., Hubbard N.J., Gast P.M., Bansal B.M., Wiesmann H., Jahn B.* Rb–Sr systematics for chemically defined Apollo 15 and 16 materials. — *Proc. Fourth Lunar Sci. Conf.*, 1973, 2.
97. *Podosek F.A., Huneke J.C., Wasserburg G.J.* Gas retention and cosmic ray exposure ages of lunar rock 15555. — *Science*, 1972, 175, N 4020, p. 423–425.
98. *Podosek F.A., Huneke J.C., Gancarz A.J., Wasserburg G.J.* The age and petrography of two Luna 20 fragments and inferences for wide-spread lunar metamorphism. — *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1973, 37, N 4, p. 887–904.
99. *Prinz M., Dowty E., Keil K., Bunch T.E.* Mineralogy, petrology and chemistry of lithic fragments from Luna 20 fines: origin of cumulate ANT suite and its relationship to highalumina and mare basalts. — *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1973, 37, N 4, p. 979–1006.
100. *Rancitelli L.A., Perkins R.W., Felix W.D., Wogman N.A.* Lunar surface processes and cosmic ray characterization from Apollo 12–15 lunar sample analyses. — In: *Proc. Third Lunar Sci. Conf.*, 1972, 2, p. 1681–1691.
101. *Schaber G.G.* Lava flows in Mare Imbrium: Geologic evaluation from Apollo orbital photography. — In: *Proc. Fourth Lunar Sci. Conf.*, 1973, 2, p. 73–92/
102. *Schaeffer O.A., Hasain L.* Early lunar history: ages of 2 to 4 mm soil fragments from the lunar highland. — In: *Proc. Fourth Lunar Sci. Conf.*, 1973, 2, p. 1847–1863.
103. *Scott D.H.* Mare Serenitatis cinder cones and terrestrial analogs. — In: *Apollo 17 Preliminary Science Report*, NASA SP-330, 1973, p. 30–7 to 30–8.
104. *Shoemaker E.M.* Origin of fragmental debris on the lunar surface and the history of bombardment of the Moon. — In: *Deputation provincial Barcelona, Instituto de investigaciones geologicas*, 1971, 25, p. 27–56.
105. *Silver L.T.* U–Th–Pb isotopic system in Apollo 11 and Apollo 12 regolithic materials and a possible age for the Copernican event (abstract). — *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1971, 52, N 7, p. 534.

106. *Stettler A., Eberhardt P., Geiss J., Grogler N., Maurer P.* ^{39}Ar – ^{40}Ar ages and ^{37}Ar – ^{38}Ar exposure ages of lunar rocks. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 2, p. 1865–1888.
107. *Strom R.G.* Lunar mare ridges, rings and volcanic ring complexes. — *Modern Geology*, 1971, 2, N 3, p. 133–158.
108. *Tera F., Papanastassiou D.A., Wasserburg G.J.* A lunar cataclysm at 3,95 AE and the structure of the lunar crust. — In: Lunar Science-IV, Houston, Lunar Science Institute, 1973, p. 723.
109. *Tera F., Papanastassiou D.A., Wasserburg G.J.* Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1974, 22, N 1, p. 1–21.
110. *Toksöz M.N., Dainty A.M., Solomon S.C., Anderson K.R.* Velocity structure and evolution of the moon. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 3, p. 2529–2547.
111. *Trask N.J.* Size and spatial distribution of craters estimated from Ranger photographs. — NASA TR-32–800, Washington DC., 1966, p. 252–263.
112. *Turner G.* Argon-40 – Argon-39 dating of lunar rock samples. — In: Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., 1970, 2, p. 1665–1684.
113. *Turner G.* ^{40}Ar – ^{39}Ar ages from the lunar maria. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1971, 11, N 3, p. 169–191.
114. *Turner G.* ^{40}Ar – ^{39}Ar age and cosmic ray irradiation history of the Apollo 15 anorthosite 15415. — *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1972, 14, N 1, p. 169–175.
115. *Turner G., Huneke J.C., Podosek F.A., Wasserburg G.J.* ^{40}Ar – ^{39}Ar ages and cosmic ray exposure ages of Apollo 14 samples. — *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1971, 2, N 1, p. 19–35.
116. *Turner G., Cadogan P.M., Yonge C.J.* Argon selenochronology. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 2, p. 1889–1914.
117. *Vinogradov A.P., Zadorozhny I.K.* Rare gases in regolith and fragments of rocks supplied by the automatic station Luna 20. — In: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., 1973, 2, p. 2065–2077.
118. *Wood J.A.* Bombardment of a cause of the lunar asymmetry. — *The Moon*, 1973, 8, p. 73–103.