

УДК 523.34

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛУННЫХ МОРЕЙ И БАССЕЙНОВ

© 2021 г. Ж. Ф. Родионова^{a, *}, А. Ю. Жаркова^{a, b}, Е. А. Гришакина^c, В. В. Шевченко^a

^aГосударственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

^cИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, РАН, Москва, Россия

*e-mail: jeanna@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 23.07.2020 г.

После доработки 22.12.2020 г.

Принята к публикации 18.01.2021 г.

Построены и изучены более 70 топографических профилей 34 крупных лунных морей и бассейнов с целью получения количественных значений параметров, характеризующих эти образования, выявления закономерностей и особенностей их рельефа. Исследована зависимость абсолютной высоты дна и глубины бассейнов от широты, долготы, размеров и относительного возраста. Абсолютная высота дна образований на видимом полушарии, как и следовало ожидать, меньше, чем на обратном полушарии. В долготном направлении заметна тенденция увеличения глубины бассейнов в направлении от центрального меридиана к 180 меридиану (от центра видимого полушария до центра обратного полушария). Гребни валов на всем протяжении каждого из бассейнов часто имеют разные высоты. В зависимости от этой разности высот гребня вала выделены три группы бассейнов, отличающиеся перепадами высот. Предполагается, что чем больше перепад высот гребней валов, тем более косым было падение ударника. Корреляции отмеченных выше параметров с относительным возрастом в данном исследовании не обнаружено. Морфометрические исследования ударных кольцевых структур на Луне и их интерпретация позволяют предположить, что в раннюю эпоху эволюции лунной поверхности в период около 4.4–4.0 млрд лет основными ударниками были тела кометной природы из Пояса Койпера или из Облака Оорта.

Ключевые слова: Луна, рельеф, моря, бассейны, абсолютные высоты, перепады высот, относительный возраст, аномалии Буге

DOI: 10.31857/S0320930X21030063

ВВЕДЕНИЕ

Топография лунных морей и бассейнов обсуждалась во многих статьях и книгах (Melosh, 1989; Spudis, 2005; Head, 2010; Byrne, 2008; 2016; Neumann и др., 2015; Smith и др., 2017). Как известно, на видимой стороне расположено больше бассейнов диаметром более 300 км, чем на обратной стороне (Miljković и др., 2013). Это можно объяснить различиями в свойствах мишени, в распределении температуры и пористости (Neumann и др., 2015; Wiczorek и др., 2013). В настоящей работе мы подробно рассмотрим количественные характеристики крупных бассейнов и некоторые особенности их строения и распределения по поверхности Луны.

Используя современную цифровую модель рельефа (ЦМР) Луны и программы ArcGIS мы построили топографические профили для 34 крупных лунных морей и бассейнов. Эти профили в основном построены в двух направлениях: север-юг и запад-восток. В ряде случаев потребовались профили в других направлениях. Наиболее точ-

ная трехмерная ЦМР рельефа Луны создана на основе объединенных данных лазерного альтиметра (LOLA) космического аппарата Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) и стереоскопических данных японского аппарата Кагуя, при горизонтальном разрешении 512 пикселей на градус (~60 м на экваторе) имеет точность по вертикали ~3–4 м (Barker и др., 2016). Для глобальной характеристики топографии лунных морей и крупных бассейнов мы использовали ЦМР с меньшим горизонтальным разрешением 118 м на пиксель (Scholten и др., 2012). Фрагмент ЦМР на район Моря Восточного и его окрестностей приведен на рис. 1. Средний уровень поверхности Луны принят равным 1737.4 км. По этим данным ранее были составлены Гипсометрическая карта Луны (Гришакина и др., 2014) и Обзорная карта Луны (Гришакина и др., 2018), которые использовались в данном случае для контроля построения профилей.

Возраст образований лунной поверхности обычно определяют по изотопному отношению в породах. На Луне выделяют следующие периоды

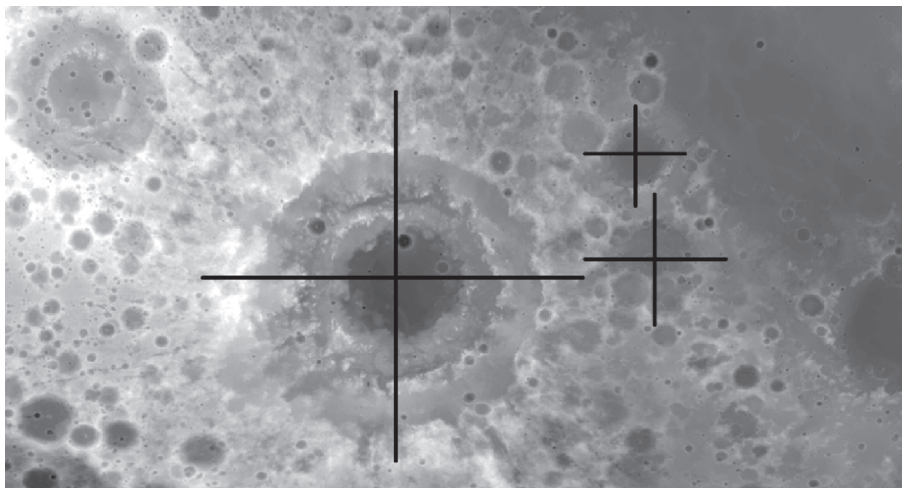


Рис. 1. Пример ЦМР на район Моря Восточного и его окрестностей. Линиями отмечены направления построения профилей.

при переходе от старых форм рельефа к молодым (Wilhelms и др., 1978): до Нектарианский (pre-Nectarian Period), Нектарианский (Nectarian Period), ранний Имбрийский (Early Imbrian Period), поздний Имбрийский (Late Imbrian Period), Эратосфеновский (Eratosphenian Period) и Коперниковский (Copernican Period). Поскольку с обратной стороны Луны образцы породы не были пока доставлены, оценка возраста событий может быть определена по отношению к возрасту образований на видимой стороне. Образования обратной стороны, которые моложе, чем Бассейн Моря Восточного относятся к Поздне-Имбрийскому периоду, Эратосфеновскому или Коперниковскому периодам в зависимости от степени разрушенности этих образований и от количества наложенных на них кратеров. Наличие лучевых систем у кратеров свидетельствует о более позднем их формировании.

Менее точная оценка возраста образования определяется по подсчету плотности кратеров и используется для определения времени бомбардировки. Так, например, для того, чтобы оценить последовательность формирования ударных бассейнов и морей, Фассет с соавторами (Fasset и др., 2012) использовали топографию LOLA LRO для определения количества наложенных ударных кратеров для 30-ти лунных бассейнов диаметром более 300 км. Бирн (Byrne, 2016) в своем каталоге предложил использовать последовательные номера как свидетельство относительного возраста 72 лунных ударных объектов. В его каталоге номера от 1 до 44 относятся к до-Нектарскому периоду, от 45 до 65 — к Нектарскому периоду, от 66 до 69 — к раннему Имбрийскому периоду и, наконец, числа от 70 до 72 соответствуют позднему Имбрийскому периоду. На рис. 2 показана карта исследуемых нами образований с указанием но-

меров Бирна, характеризующих последовательность их формирования. Исследованы все моря и бассейны, имеющие округлую форму, диаметром более 300 км, а также хорошо сохранившиеся структуры диаметром 200 км и более. Обзорная карта Луны (Гришакина и др., 2018) использована в качестве основы рис. 2.

В табл. 1 нами проведено сравнение периодов образования (последовательного возраста) лунных бассейнов в работах (Fasset и др., 2012) и (Byrne, 2016). Последовательность образования бассейнов отличается в двух работах. Для корреляционного анализа возрастных особенностей бассейнов мы использовали в дальнейшем данные Бирна (Byrne, 2016), как более полные.

ХАРАКТЕРИСТИКА НЕКОТОРЫХ ПРОФИЛЕЙ БАСЕЙНОВ И МОРЕЙ ЛУНЫ. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Детальный профиль гигантского бассейна Южный полюс—Эйткен в направлении север-юг, вдоль меридиана 180° (рис. 3а) показал значительный перепад высот: от +6 до -8 км (Чуйкова и др., 2019). Новые профили этого древнего бассейна диаметром более 2500 км, построены нами в направлении запад-восток вдоль параллели 56° (рис. 3б).

Образования, сформированные на дне бассейна в результате последующих ударных процессов, имеют ассиметричные склоны в соответствии с рельефом дна бассейна (рис. 3а, 3б). По мнению Мелоза и его соавторов (Melosh и др., 2017) при образовании самого крупного бассейна Луны была вскрыта верхняя мантия Луны и большое количество этого материала отложено на склонах гигантского образования. В отличие от ряда работ, признающих происхождение бассейна в ре-

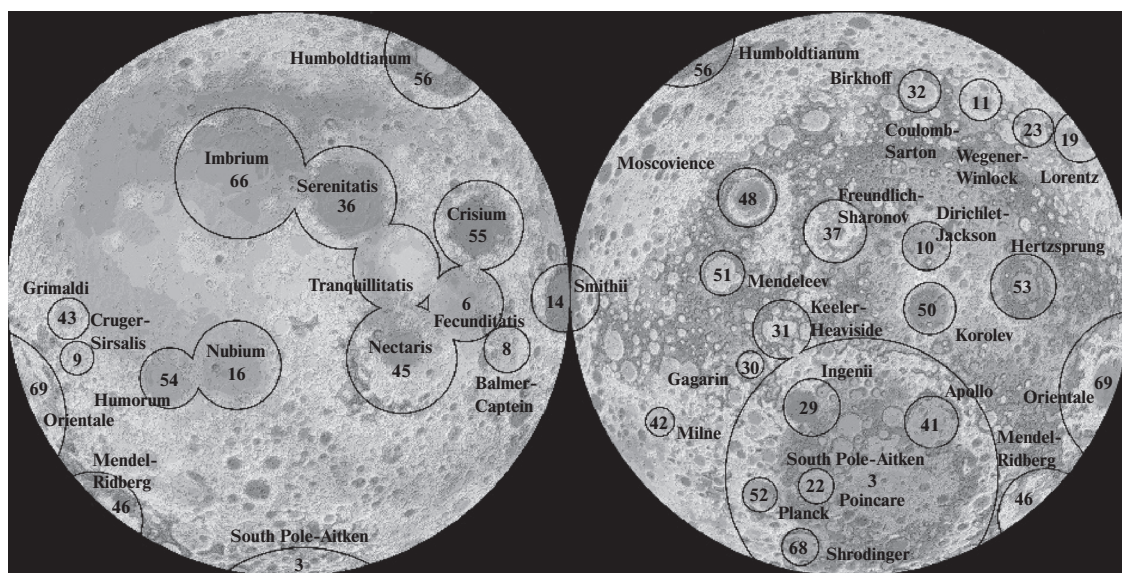


Рис. 2. Последовательные номера, присвоенные Бирном (Birne, 2016) морям и крупным бассейнам.

зультате падения крупного астероида в работе (Шевченко и др., 2007) сделан вывод о том, что уникальные особенности природы бассейна могли быть обусловлены необычным формированием бассейна в результате воздействия тела кометного типа. Интересно, что кратеры в бассейне Южный полюс–Эйткен оказались менее разрушенными, чем те, которые находятся в области морей. Террасы на внутренних склонах этих кратеров, также менее деградированы (Родионова, Козлова, 2000). Ученые Бэйлорского университета в США обнаружили в районе крупнейшего бас-

сейна Луны гравитационную аномалию. По мнению астрономов, она может представлять собой остатки металлического астероида. Еще одним объяснением является вулканическая активность. В лунной мантии содержится высокая концентрация оксидов титана, которая при остывании излившейся магмы могла сосредоточиться под бассейном Южный полюс–Эйткен.

На профилях бассейна Аполлон диаметром 524 км (рис. 4), расположенном внутри бассейна Южный полюс–Эйткен, видно, что северный гребень расположен выше южного на 4.5 км. Во-

Таблица 1. Сравнительная таблица определения последовательного возраста

Название бассейна	Фассет	Бирн	Название бассейна	Фассет	Бирн
ЮПЭ	PN	3	Фрейндлих–Шаронов	PN/N	37
Кулон–Сартон	PN	11	Нектара	N	45
Дирихле–Джексон	PN	10	Королев	N/PN	50
Крюгер–Сирсалис	PN	9	Менделеев	N/PN	51
Смита	PN	14	Герцшпрунг	N/PN	53
Шиллер–Цукки	PN	13	Гримальди	N/PN	43
Амундсен–Гансвиндт	PN	15	Мендель–Ридберг	N/PN	46
Пуанкаре	PN	22	Москвы	N	48
Лоренц	PN	19	Кризисов	N	55
Фицджеральд–Джексон	PN	21	Влажности	N	54
Биркхоф	PN	32	Гумбольдта	N	56
Мечты	PN	29	Дождей	I	66
Ясности	PN	36	Шредингер	I	68
Аполлон	PN/N	41	Восточное	I	69

PN – до Нектарианский период, N – Нектарианский период, I – Ибрийский период.

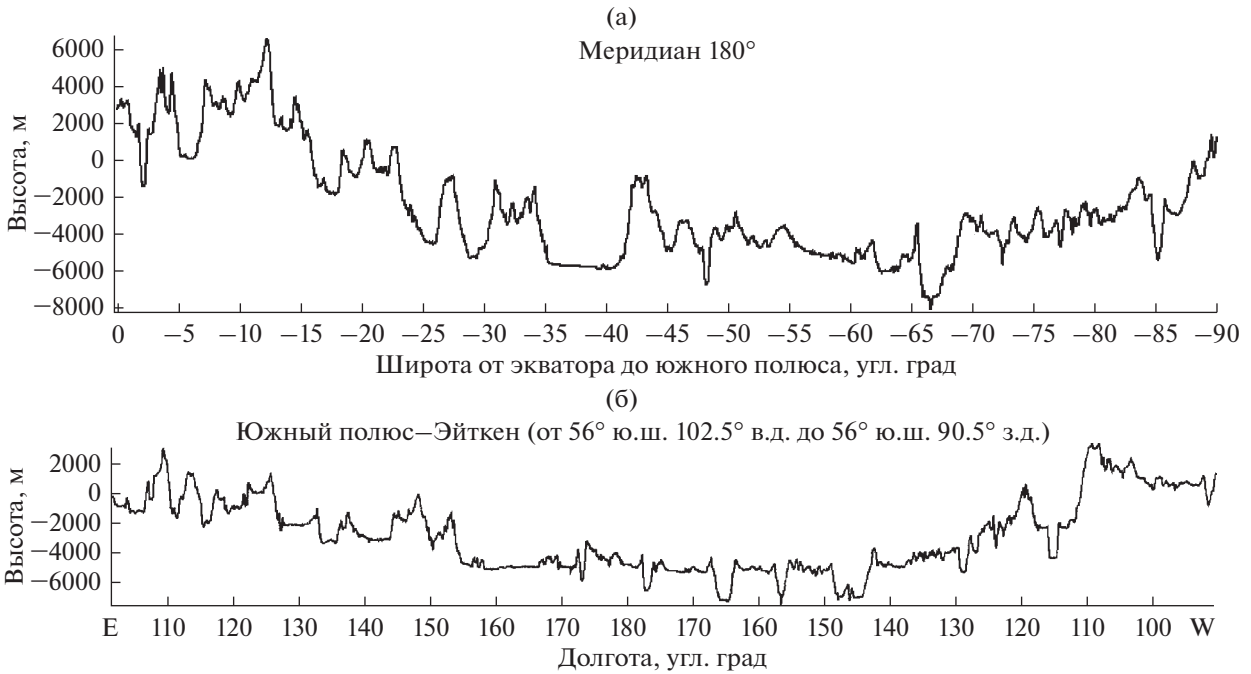


Рис. 3. (а) Профиль бассейна Южный полюс–Эйткен, построенный для южного полушария вдоль меридиана 180°. (б) Профиль бассейна Южный полюс–Эйткен, построенный вдоль параллели 56° S.

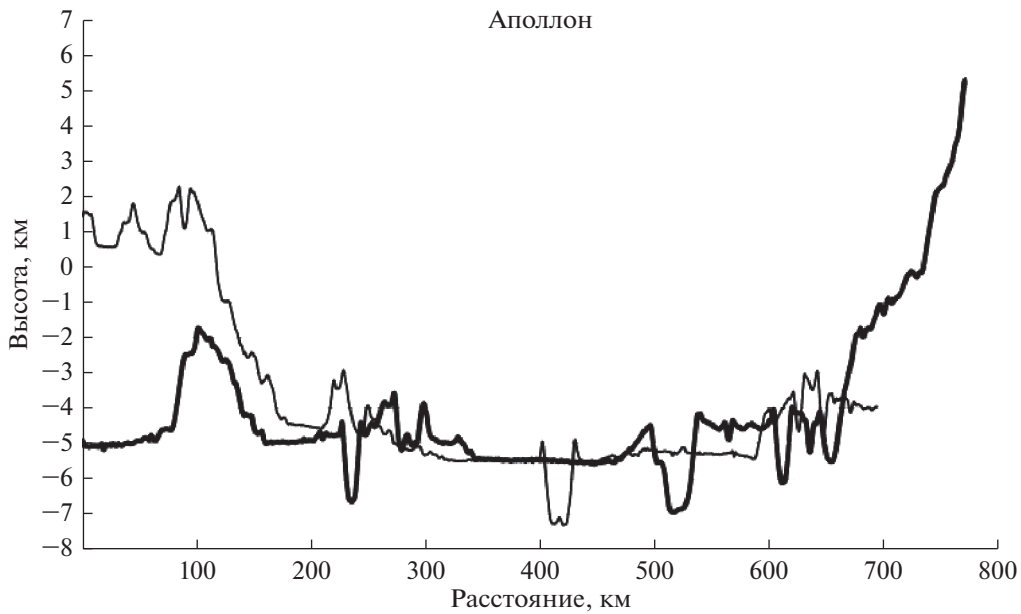


Рис. 4. Профили бассейна Аполлон. Тонкой линией (на всех профилях) показан профиль в направлении север-юг, жирной линией – профиль в направлении запад-восток.

сточный гребень Аполлона отличается от западного на 6 км. Абсолютная высота дна бассейна соответствует отметке -5.5 км. Над дном бассейна возвышается частично сохранившееся внутреннее кольцо, высотой около 2 км. Большое отличие в высотах гребня бассейна объясняется его

расположением на внутреннем склоне гигантского бассейна Южный полюс–Эйткен.

На рис. 5 представлены профили бассейна Королев диаметром 423 км. Северный гребень находится на отметке 8.6 км, а южный на отметке 8.0 км, западный вал отличается от восточного на 0.8 км.

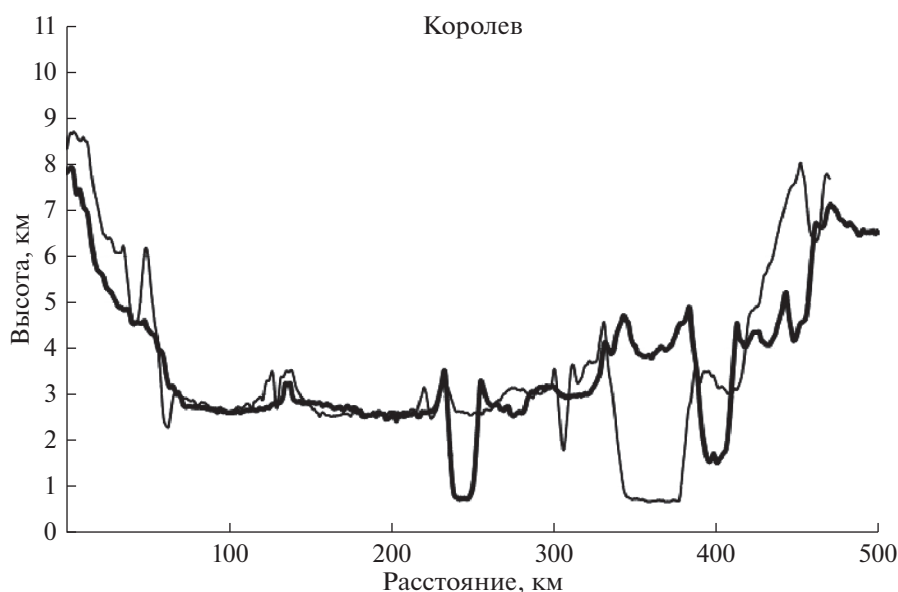


Рис. 5. Профили бассейна Королев.

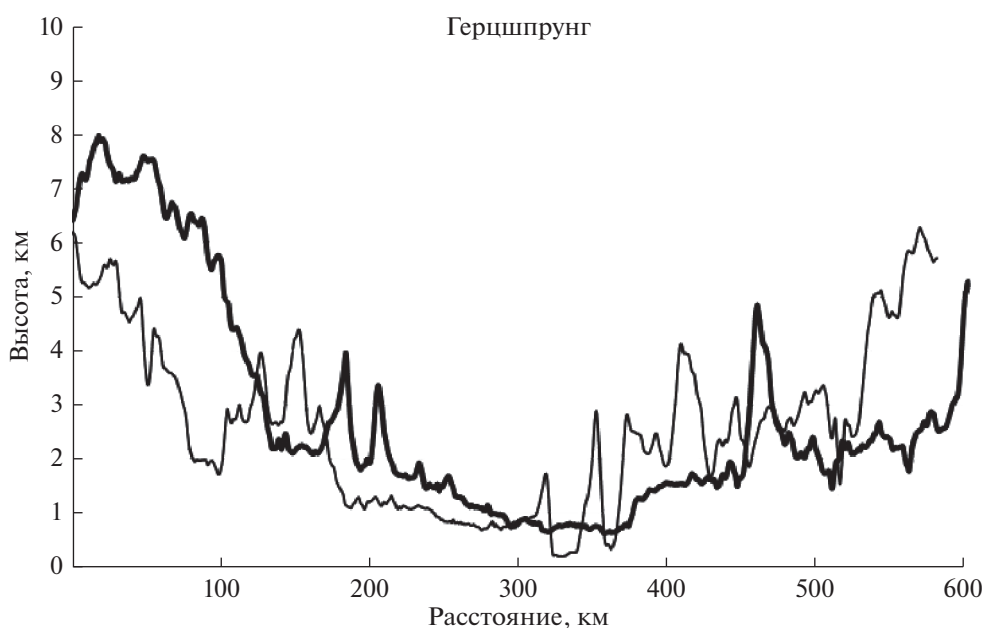


Рис. 6. Профили бассейна Герцшпрунг.

Внутреннее кольцо бассейна сильно разрушено и прослеживается только частично, возвышаясь над дном бассейна на 1–2 км.

В отличие от Королева в бассейне Герцшпрунг диаметром 536 км (рис. 6) хорошо прослеживается внутреннее кольцо, возвышающееся над дном на 3.5 км. Склоны бассейна асимметричны. Гребни северного и южного валов находятся на одинаковой отметке 6.3 км. В то время, как разница в

высотах западного и восточного гребней составляет около 3 км.

Бассейн Моря Москвы представляет особый интерес, поскольку является трехкольцевым образованием с асимметричными склонами и самой тонкой корой в основании. Внутреннее кольцо, вероятно, представляет собой материал, поднятый и обнаженный из глубины (Head, 2010). Данные прибора МЗ КА “Чандрайаан-1” выявили

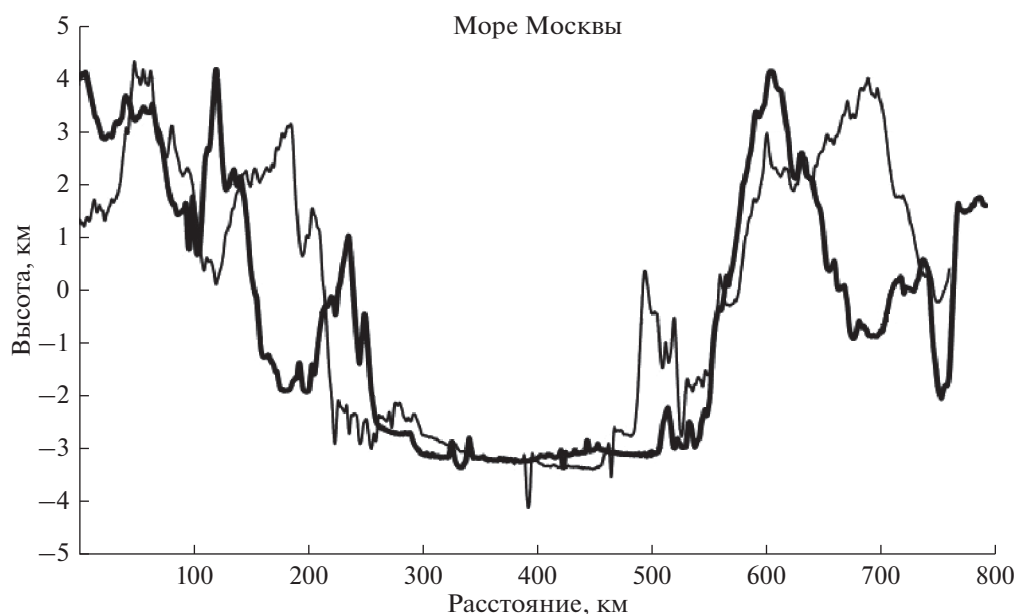


Рис. 7. Профили Моря Москвы.

весьма необычные типы горных пород в пределах бассейна Моря Москвы (Pieters и др., 2011).

На профиле Моря Москвы (рис. 7) в направлении север/юг, видно, что северный склон более крутой. На менее крутом южном склоне возвышаются три гребня с отметками 0.4, 3.0 и 4.0 км. Таким образом, южный внутренний склон бассейна представлен тремя гребнями, возвышающимися над дном на 3, 6 и 8 км, в то время как северный склон представлен гребнями высотой 3.2 и 4.3 км. Дно бассейна, наклоненное к югу, находится на отметке минус 3.2 км. Западный склон менее крутой, чем восточный. Внешний западный гребень находится на отметке 4.2 км, как и более крутой восточный гребень. Таким образом, перепад высот в бассейне (глубина Моря Москвы) составляет около 8 км.

Многокольцевой бассейн Моря Восточного представлен на профилях рис. 8. Наивысшие отметки гребней северного склона составляют 3.5, 3, 1.7 км, в то время как южного склона 5, 4.4, 3.2 км и несколько гребней, расположенных ниже 1 км. Наблюдается в среднем разница в 1 км. Самая низкая отметка дна — 2.9 км. На западном склоне наивысшие отметки гребней составляют 7.3, 5.2 км и несколько гребней ниже 1 км, а на восточном: 3.2, 2.2 км и ниже 1 км. Таким образом, в отличие от направления север/юг восточный склон бассейна Моря Восточного на 4 км ниже западного.

Бассейн Моря Кризисов вытянут в направлении запад/восток, поэтому профили в направлении север/юг и запад/восток отличаются (рис. 9). Абсолютная отметка дна Моря Кризисов состав-

ляет -3.6 км. Северный гребень вала, находится на отметке 1.8 км, в то время как сложный южный гребень вала на отметке от минус 0.7 км до плюс 0.4 км. Разница в высотах гребня составляет около 2 км. Несколько гребней можно видеть на западном и восточном склонах. Восточный вал разрушен и его гребни расположены на отметках от минус 0.5 км до плюс 2 км. Максимальный перепад высот в Море Кризисов составляет 5.5 км.

Средняя отметка дна Моря Смита (рис. 10) составляет -3.6 км. Северный гребень вала находится ниже западного на 1.5 км, ниже южного на 0.3 км. Максимальный перепад высот в Море Смита составляет около 5 км.

Профили бассейна Моря Нектара (рис. 11) в направлении север/юг выглядят симметричными, в то время, как в направлении запад/восток асимметричными. Дно бассейна находится на отметке -2.7 км. Северный и южный гребни расположены на высоте около 1 км, а западный и восточный гребни отличаются по высоте на 2.5 км. На внутреннем склоне западного вала отчетливо видны два гребня, составляющие сброс Алтай, а на восточном три гребня — Пиренеи. Как и следовало ожидать, профили морей видимой стороны (рис. 9–11) отличаются от профилей бассейнов обратной стороны (рис. 3–8) более ровной поверхностью дна.

Наше исследование показывает, что в зависимости от разности высот гребня вала (Δh) можно составить три группы крупных бассейнов и морей: 1 — с разницей в высоте гребней от 6 до 2.9 км; 2 — от 2.2 до 1.5 км; 3 — менее 1.2 км (табл. 2). Этот параметр введен нами, по-видимому, впервые. В первую и

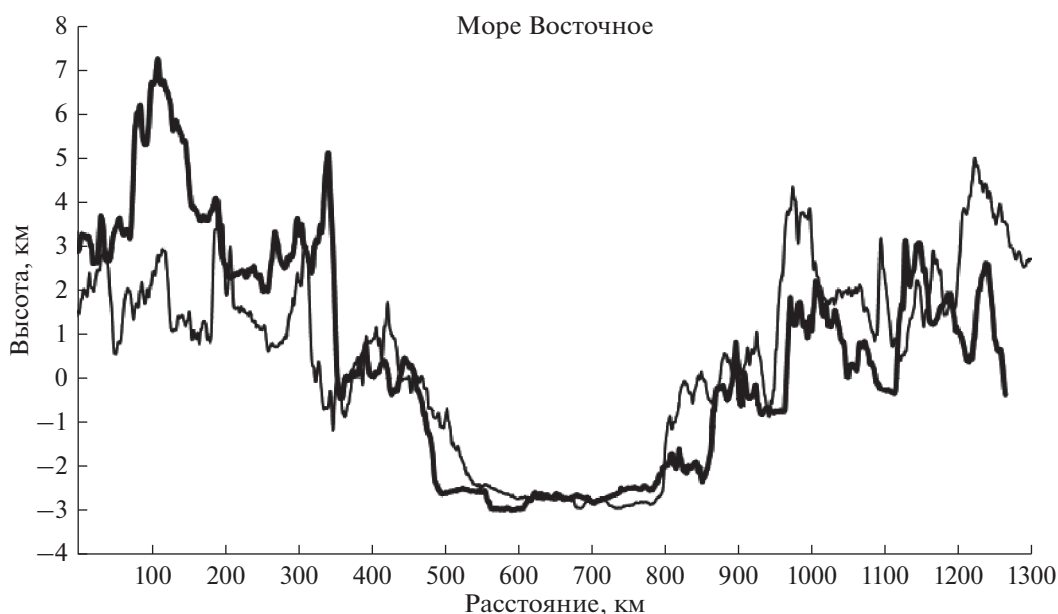


Рис. 8. Профили бассейна Море Восточное.

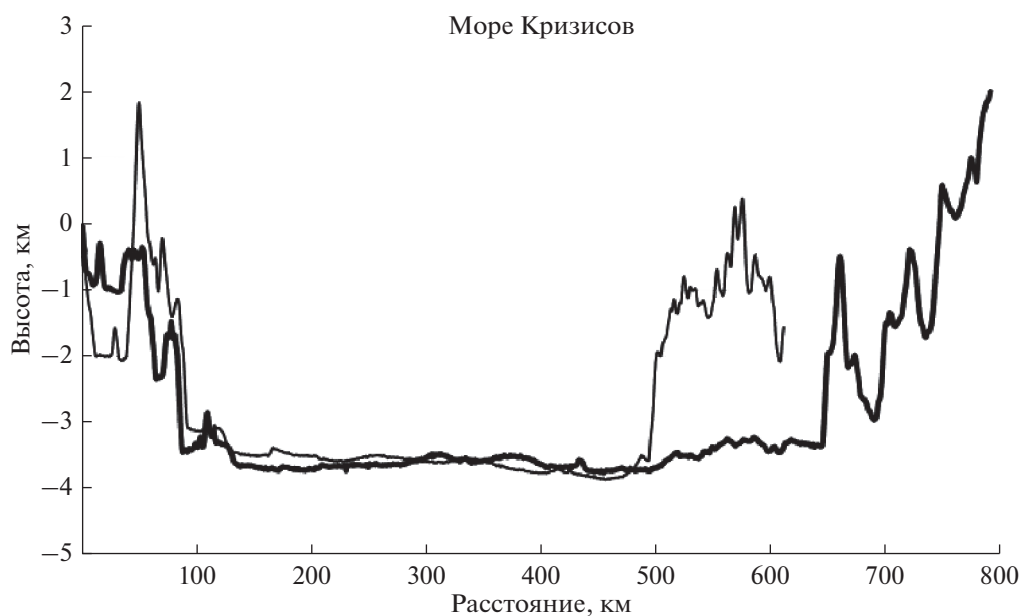


Рис. 9. Профили Моря Кризисов.

вторую группы попали как до-нектарианского, нектарианского, так и имбрийского возраста бассейны, причем последовательность номеров Бирна не зависит от перепада высот гребней. В третьей группе не оказалось бассейнов имбрийского периода, а последовательные номера встречаются как до-нектарианского, так и нектарианского периодов. Выявлена слабая зависимость ($r = 0.15$) перепада высот гребня вала от последовательных номеров Бирна.

Можно предположить, что бассейны первой группы сформировались при более низких углах падения ударников, образовавших бассейны, чем остальные.

В табл. 3 приведены названия исследованных нами морей и бассейнов, координаты, диаметры, абсолютная высота дна, величина аномалий Буге (Neumann и др., 2015) и последовательные номера Бирна (Burgne, 2016), соответствующие относительному возрасту образований, среднее значе-

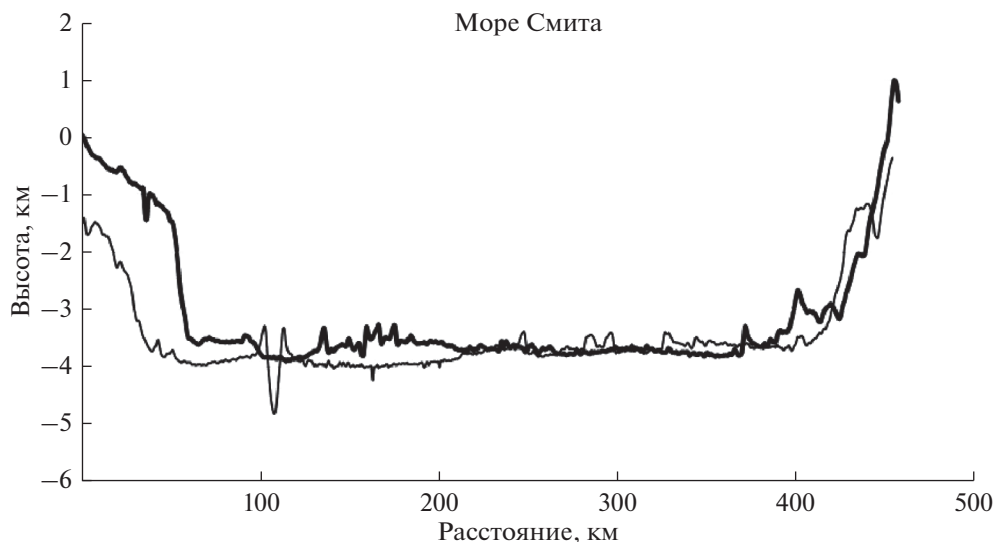


Рис. 10. Профили Моря Смита.

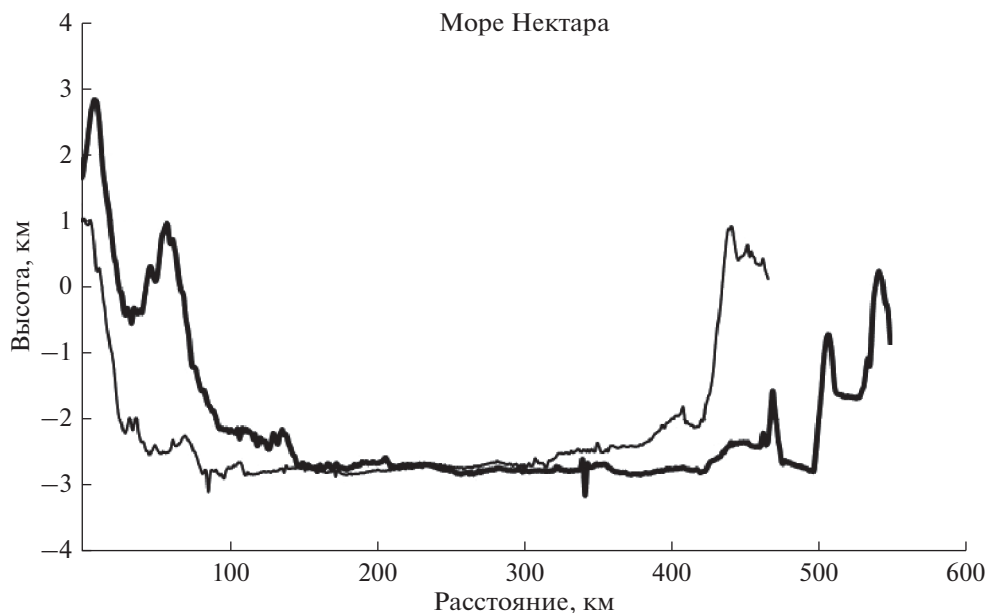


Рис. 11. Профили Моря Нектара.

ние различия в высотах гребня вала, среднее значение глубины исследуемого образования, а также отношение глубины к диаметру.

Нами исследована зависимость параметров, приведенных в табл. 3, от широты (рис. 12а, 12б), долготы (рис. 13, 14), диаметров (рис. 15, 16) и последовательных номеров Бирна (Вугпе, 2016), отмеченных на рисунках номерами. Звездочкой обозначено Море Спокойствия, которого не оказалось в таблице Бирна. Ромбиками показаны моря видимой стороны, кружками — бассейны обратной стороны.

На разных широтах можно видеть отрицательные и положительные значения абсолютных высот дна, глубин бассейнов, а также разные последовательные номера Бирна. Коэффициент корреляции абсолютной высоты дна морей и бассейнов от широты для всей Луны (рис. 12а) составляет $r = -0.27$ (слабая обратная корреляция). Если же отдельно рассматривать видимое ($r = -0.57$) и обратное полушария ($r = 0.45$), то наблюдается заметная обратная и умеренная положительная корреляции. Для рис. 12б характерна слабая обратная корреляция ($r = -0.26$).

Таблица 2. Три группы бассейнов, отличающихся разницей в высотах гребней

Название	\hat{h}	SN	Название	\hat{h}	SN	Название	\hat{h}	SN
Аполлон	6.0	41	Дождей	2.2	66	Мендель—Ридберг	1.2	46
Влажности	4.3	54	Биркхоф	2.2	32	Королев	1.1	50
Нектара	4.2	45	Крюгер—Сирсалис	2.2	9	Планк	1.1	52
Восточное	4.1	69	Спокойствия	2.0	*	Изобилия	1.0	6
ЮПЭ	4.0	3	Гримальди	2.0	43	Облаков	1.0	16
Милн	3.5	42	Лоренц	2.0	19	Шиллер—Цукки	1.0	13
Кулон—Сартон	3.5	11	Фрейндлих—Шаронов	1.8	37	Бальмер—Каптейн	0.7	8
Мечты	3.2	29	Герцшпрунг	1.8	53	Гумбольдта	0.7	56
Гагарин	2.9	30	Килер—Хевисайд	1.7	38	Москвы	0.4	48
Шредингер	2.9	68	Пуанкаре	1.7	22	Смита	0.3	14
			Менделеев	1.5	51	Ясности	0.1	36
			Дирихле—Джексон	1.5	10			
			Вегенер—Уинлокк	1.5	23			

На видимой стороне Луны абсолютная высота дна систематически меньше, чем на обратной стороне. Это можно объяснить тем, что толщина коры на видимой стороне меньше, чем на обратной стороне, а также тем, что бассейны морей залиты лавой. Коэффициент корреляции абсолютной высоты дна бассейнов от долготы ($r = -0.23$) свидетельствует о слабой отрицательной корреляции (рис. 13).

Глубина в бассейнах видимой стороны Луны систематически меньше, чем бассейнов обратной стороны, как и следовало ожидать. На рис. 14 видно, что глубина исследованных структур систематически увеличивается от центра видимой стороны к центру обратной стороны. Если рассматривать отдельно восточное и западное полушария на рис. 14, то наблюдается заметная прямая связь ($r = 0.69$) для восточного полушария и и отрицательная высокая для западного полушария ($r = -0.74$). Другими словами с увеличением долготы по абсолютной величине увеличивается глубина бассейнов. Зависимости относительного возраста бассейнов от широты и долготы не обнаружено.

Прослеживается зависимость аномалий Буге от диаметров. На графике рис. 15 хорошо видно, что меньшие значения аномалий Буге в целом характерны для обратной стороны Луны. Наблюдается умеренная корреляция зависимости аномалий Буге от диаметров бассейнов ($r = 0.32$) и слабая корреляция ($r = 0.14$) между глубиной и диаметром бассейнов. Море Дождей, Море Спокойствия и бассейн Южный полюс-Эйткен выпадают из общей зависимости. Увеличение значенний аномалий Буге от диаметров ранее было отмечено в работах (Melosh и др., 2013; Neumann и др., 2015; Вурне 2016). Основными параметрами, управляющими гравитационными характери-

ками масконов, являются энергия удара, тепловой градиент Луны в момент удара, толщина коры и степень вулканического заполнения (Melosh и др., 2013).

Глубина морей и бассейнов с увеличением диаметров увеличивается как на видимом, так и на обратном полушариях. На обратном полушарии Луны глубина бассейнов больше, чем на видимом полушарии. Отношение глубины к диаметру (табл. 3) для бассейнов до-нектарианского периода с увеличением возраста увеличивается, а для нектарианского периода уменьшается. Однако наибольшая разница наблюдается между видимой (где d/D изменяется от 0.001 до 0.10) и обратной (где d/D от 0.003 до 0.037) сторонами.

РОЛЬ КОЛЬЦЕВЫХ МЕГАОБРАЗОВАНИЙ В ИСТОРИИ ЛУНЫ

Лунная поверхность является лучшим архивом, сохранившим многие следы ударных процессов в Солнечной системе за последние 4.5 млрд лет. На Луне ударные образования, возникшие в разные периоды истории, сохраняются лучше, чем на поверхности более сложных планет, таких как Земля, Марс и Венера, которые в значительной степени утратили древние свидетельства истории Солнечной системы в результате эндогенной переработки рельефа, а также в результате гидросферного или атмосферного выветривания. Изучение ударных структур на Луне позволяет в конечном итоге приходиться к определению родительских тел ударных структур, которые в разные эпохи могли иметь различную природу.

Наибольший интерес представляет реконструкция ударных процессов в самой ранней истории формирования лунной поверхности. По современным представлениям после выделения и

Таблица 3. Параметры морей и бассейнов

Название	Шир. °	Долг. °	Диам., км	Абс. <i>H</i> дна, км	Аном. Буге, мГал	SN	$\wedge h$	Глуб. <i>d</i> , км	<i>d/D</i>
ВИДИМОЕ ПОЛУШАРИЕ ЛУНЫ									
Море Дождей	38	−19	1312	−2.5	375	66	2.2	1.5	0.001
Море Ясности	27	20	696	−2.7	450	36	0.1	2.0	0.003
Море Кризисов	17	59	740	−3.8	598	55	2.0	5.0	0.007
Море Гумбольдта	58	83	608	−4.4	482	56	0.7	3.5	0.006
Море Спокойствия	8	31	875	−1.5	−200	—	2.0	2.5	0.003
Море Изобилия	−2	52	660	−2.2	205	6	1.0	1.9	0.003
Море Смита	−2	87	820	−3.6	494	14	0.3	4.5	0.006
Море Восточное	−20	−95	960	−2.5	720	69	4.1	8.5	0.009
Гримальди	−5	−68	431	−1.8	431	43	2.0	2.9	0.007
Крюгер—Сирсалис	−17	−67	628	−1.3	331	9	2.2	2.8	0.004
Море Влажности	−24	−39	800	−2.2	450	54	4.3	2.8	0.004
Море Облаков	−18	−15	712	−2.3	81	16	1.0	1.8	0.003
Море Нектара	−14	34	840	−3.2	514	45	4.2	5.5	0.007
Мендель—Ридберг	−5	−94	572	−2.8	572	46	1.2	5.5	0.010
Балмер—Каптейн	−16	70	288	−1.3	192	8	0.7	1.2	0.004
ОБРАТНОЕ ПОЛУШАРИЕ ЛУНЫ									
Море Москвы	26	147	368	−3.5	632	48	0.4	7.5	0.020
Менделеев	5	141	304	−1.2	159	51	1.5	6.0	0.020
Фрейндлих—Шаронов	18	176	564	−2.5	528	37	1.8	6.5	0.020
Биркгоф	59	−147	292	−0.8	90	32	2.2	4.5	0.015
Кулон—Сартон	52	121	700	−2.0	391	11	3.5	5.5	0.008
Вегенер—Уинлокк	40	−108	184	−1.5	37	23	1.5	3.5	0.019
Лоренц	33	−97	336	−1.5	240	19	2.0	4.5	0.013
Дирихле—Джексон	13	−158	384	4.0	189	10	1.5	4.5	0.012
Герцшпрунг	2	−130	524	0.9	404	53	1.8	6.8	0.013
Килер—Хевисайд	−10	156	190	−1.0	5	31	1.7	7.0	0.037
Королев	−5	−157	398	3.2	173	50	1.1	5.7	0.014
Милн	−31	113	228	−2.0	195	42	3.5	6.0	0.026
Море Мечты	−33	164	292	−3.5	181	29	3.2	6.2	0.021
Аполлон	−36	−151	480	−5.5	329	41	6.0	7.5	0.016
Южный полюс—Эйткен	−48	−172	2694	−6.0	395	3	4.0	9.0	0.003
Планк	−58	136	296	−2.5	167	52	1.1	5.5	0.019
Пуанкаре	−57	163	292	−5.0	185	22	1.7	3.5	0.012
Шредингер	−75	133	298	−4.5	240	68	2.9	6.0	0.020
Гагарин	−20	150	232	0.3	43	30	2.9	6.2	0.026

окончательного отвердения лунной коры, Луна подверглась интенсивной бомбардировке, в результате которой образовалось сохранившихся до настоящего времени от 30 до 40 ударных кольцевых структур диаметром от 300 км и более (Tartèse и др., 2019). На последующих этапах эволюции лунной поверхности часть этих кольцевых образований в процессе эндогенной активности была за-

полнена базальтовыми лавами, превратившись в лунные моря. В результате возраст возникновения большинства из этих кольцевых структур точно не известен. По общему мнению, наиболее древним образованием является бассейн Южный полюс—Эйткен. По результатам кратерной статистики и данным о возрасте образцов, определенном по отношению $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, в предположении, что эти

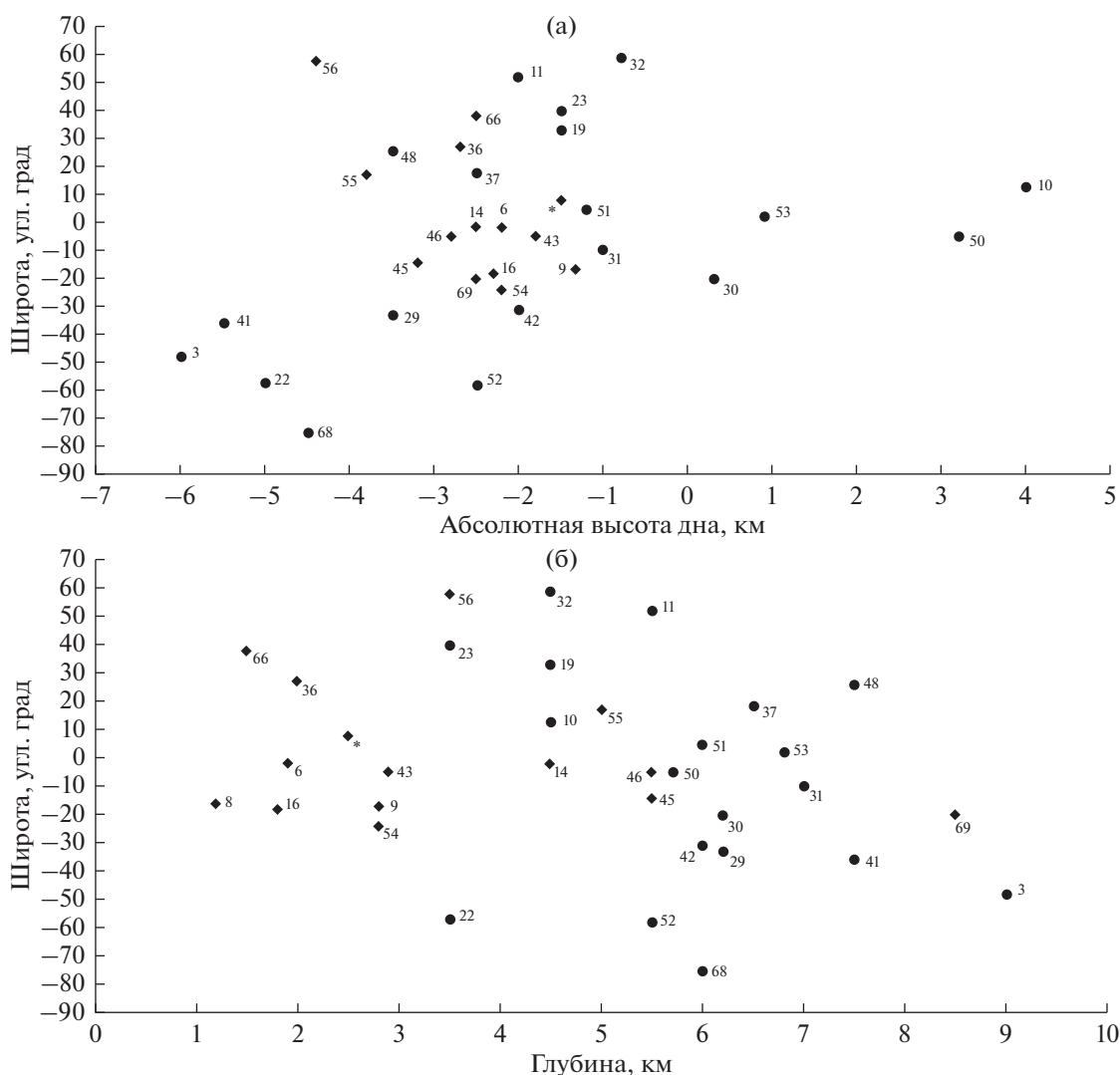


Рис. 12. Графики зависимости: (а) абсолютной высоты дна от широты; (б) глубины от широты. Ромбиками показаны бассейны видимой стороны, кружочками – бассейны обратной стороны Луны.

фрагменты относятся к внутренней части бассейна, формирование структуры Южный полюс–Эйткен датируется временем 4.25–4.33 млрд лет назад.

Одним из указаний на то, что ударник, в результате падения которого возникло кольцевое образование Южный полюс–Эйткен, принадлежал, по-видимому, к иной популяции, служит зависимость аномалий Буге от диаметров структур, приведенная на рис. 15. Другим указанием на аномальную природу происхождения бассейна Южный полюс–Эйткен служит характер зависимости глубины экскавации при образовании кольцевой структуры от диаметра первичной депрессии, приведенный на рис. 17.

На рис. 17 приведена зависимость глубины экскавации при ударном образовании кольцевых структур диаметром от 200 до 500 км (1) по дан-

ным из работы (Wieczorek, Phillips, 1999). Бассейн Южный полюс–Эйткен по данным тех же авторов в системе приводимой зависимости имеет обособленное положение (2).

В ГАИШ МГУ были выполнены исследования мегарельефа обратного полушария с целью реконструкции самого внешнего кольца бассейна (Шевченко и др., 2007; Pugacheva и др., 2008). Выяснилось, что внешнее кольцо бассейна прослеживается по системе возвышенностей в северо-западной, северной, северо-восточной и восточной части кольцевой структуры. Основным выводом из анализа полученной рельефной модели является выделение кольца положительных форм рельефа, которые с большой долей вероятности соответствуют положению и размерам первоначального внешнего кольца сложной структуры бассейна. Наиболее сохранившиеся формы пер-

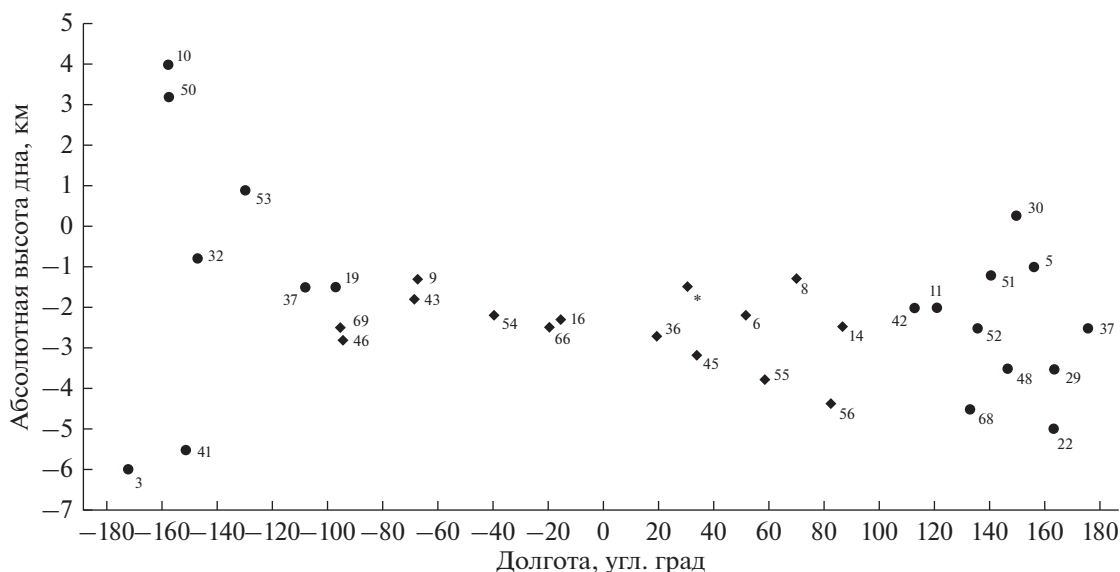


Рис. 13. График зависимости абсолютной высоты дна бассейнов от долготы.

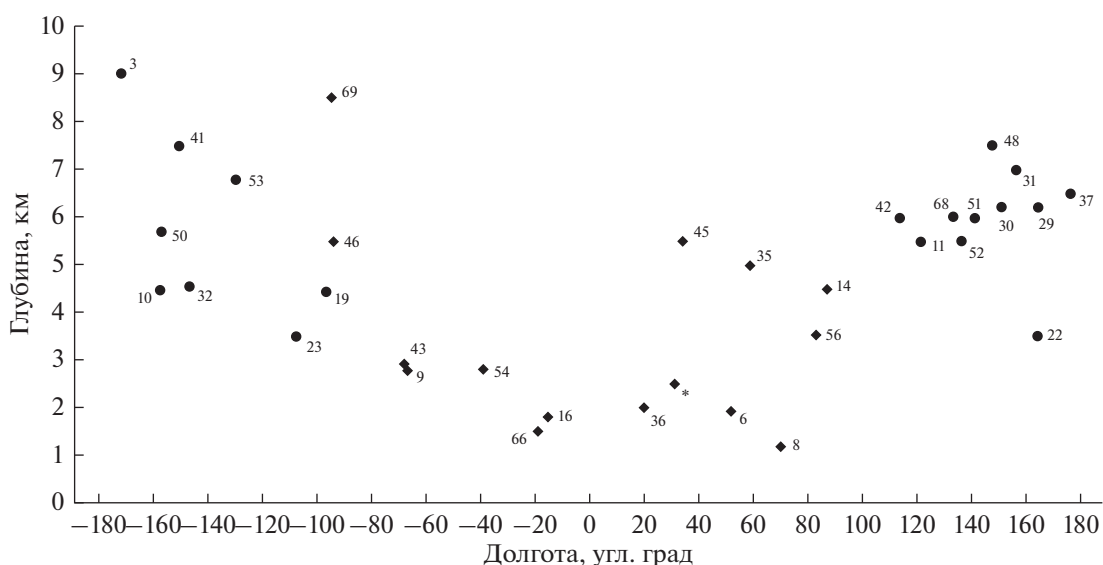


Рис. 14. Зависимость глубины бассейнов от долготы.

воначальной структуры содержатся в северо-западном и северо-восточном сегментах кольца. Хребтовая часть образования, располагающаяся между районом кратера Циолковский и южной окраиной впадины Моря Москвы, достигает в своей наиболее возвышенной части около +3 км. Северо-восточный сегмент включает хребтовые участки с высотами до +7...+8 км в области от района бассейна Королев до района западной окраины внутренней впадины Моря Восточного. Предполагая наличие некоторой круговой симметрии первоначальной структуры внешнего кольца бассейна, можно оценить параметры об-

щих размеров этого уникального по величине лунного образования. Если принять в качестве условной внешней границы образования срединную область протяженных хребтов, диаметр образования в среднем можно оценить величиной около 3500 км (Шевченко и др., 2007). Этим данным на рис. 17 соответствует еще более anomalous положение бассейна Южный полюс–Эйткен (3).

В ГАИШ МГУ также был проведен комплексный анализ особенностей распределения в пределах бассейна Южный полюс–Эйткен химического состава поверхностных пород и рельефа. На основании комбинированного анализа гипсомет-

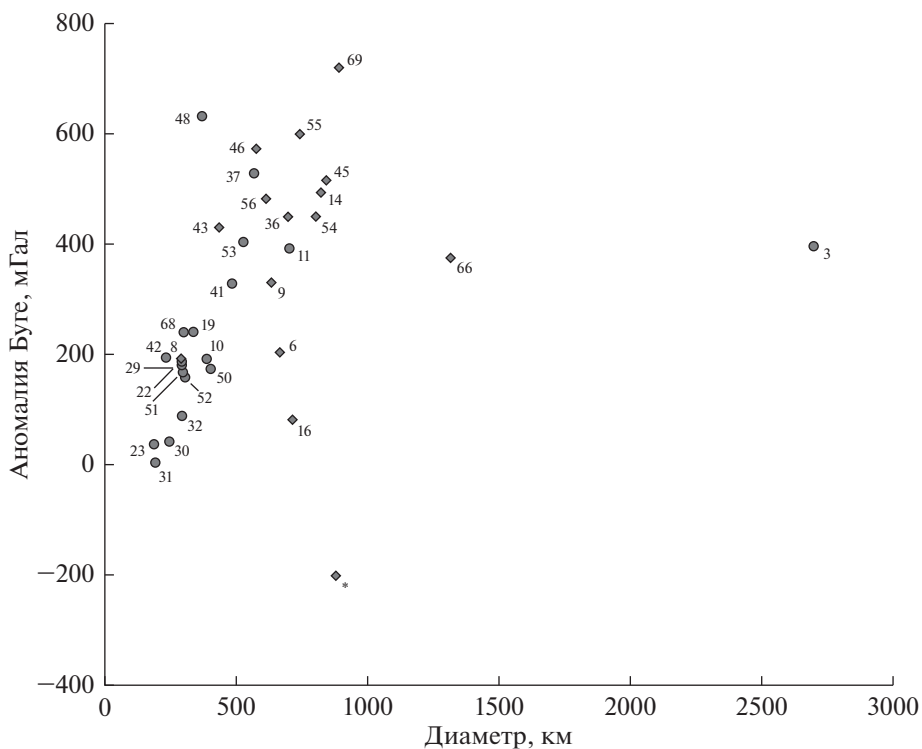


Рис. 15. Зависимость аномалий Буге от диаметров бассейнов.

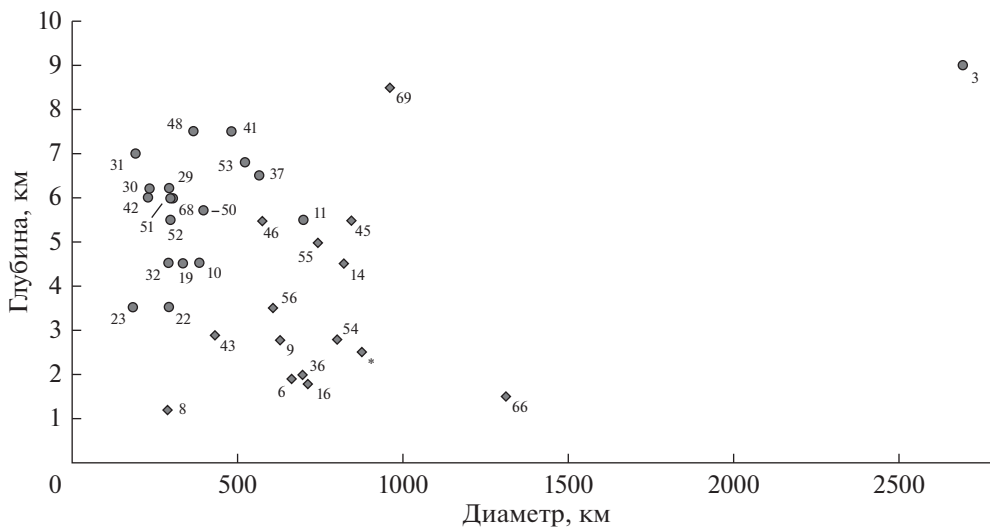


Рис. 16. Зависимость глубины бассейнов от диаметров.

рических данных и химического состава пород на разных высотных уровнях, были построены эллипсы, соответствующие граничным значениям перепадов высот и содержания железа и тория. В результате удалось выявить несколько колец, образующих многокольцевую структуру бассейна, и некоторые характеристики падавшего тела.

Схема многокольцевой структуры бассейна показана на рис. 18.

Уникальной особенностью рассматриваемого лунного образования является отличие от центрально-круговой симметрии в расположении внутренних колец бассейна. Подтверждением реальности такой модели строения бассейна явля-

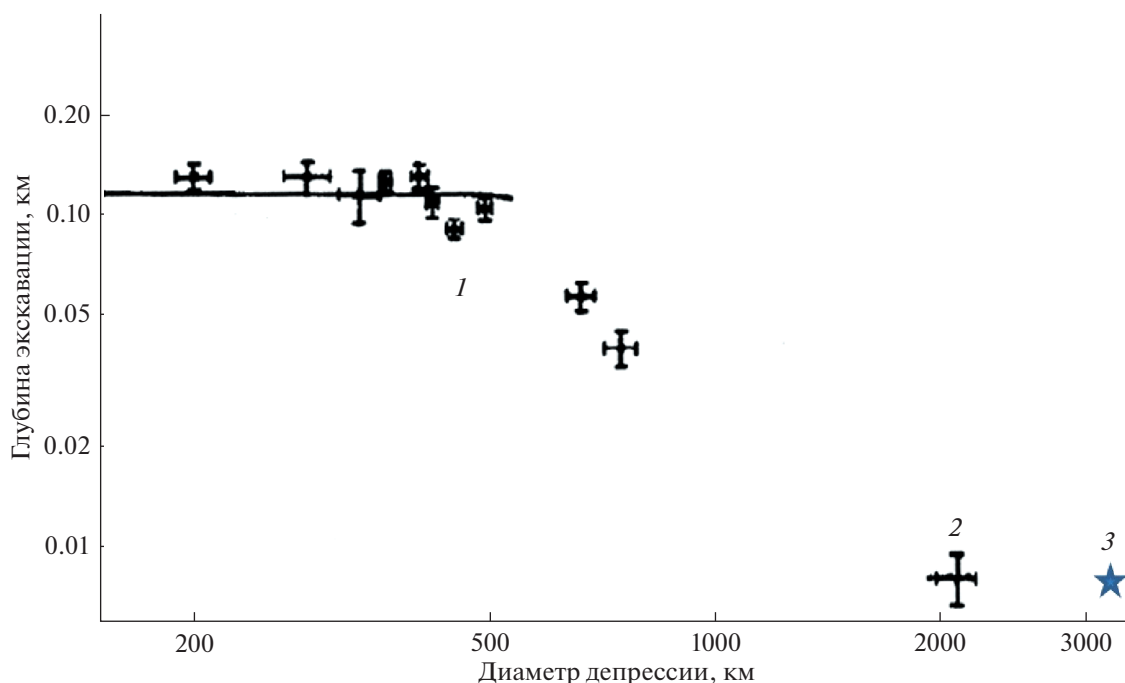


Рис. 17. Зависимость глубины экскавации от диаметра первичной депрессии кольцевых структур.

ется систематический четко выраженный сдвиг центров отдельных колец в одном направлении: к юго-востоку от центра внешнего кольца. Это направление составляет угол с плоскостью лунного экватора (или плоскостью эклиптики, что в первом приближении одно и то же) около 75° . На рис. 18 это направление указано протяженной стрелкой.

Если предположить, что обнаруженное смещение центров внутренних депрессий явилось следствием косога падения тела, образовавшего бассейн Южный полюс—Эйткен, то не исключено, что указанное направление можно интерпретировать как след траектории движения упавшего небесного тела непосредственно перед контактом с лунной поверхностью. Не вдаваясь в подробности моделирования самого ударного процесса, можно указать на два достоверных факта. Гипотетический ударник двигался по траектории (или орбите) почти нормально ориентированной к плоскости эклиптики. Из известных нам к настоящему времени крупных объектов Солнечной системы такими орбитами обладают долгопериодические кометы или объекты Пояса Койпера, что, возможно, одно и то же. Поскольку астероиды или планетезимали прошлого имели орбиты, близкие к плоскости эклиптики (или к плоскости допланетного диска), это в значительной степени уменьшает вероятность ударного образования данного бассейна в результате падения таких тел.

Другой весьма вероятной особенностью гипотетического ударника является его малая плот-

ность. Несмотря на то, что перепад высот в бассейне Южный полюс—Эйткен достигает значительной величины в отдельных точках, первичное глубинное проникновение этой структуры оказывается относительно небольшим с учетом громадных размеров всего образования.

На рис. 19 показан профиль кольцевой структуры вдоль меридиана 180° , представленный выше на рис. 3а, в который вписан эллипс правильной формы.

На рис. 20 приведен профиль, показанный выше на рис. 3б, в который вписан эллипс правильной формы. Этот профиль пересекает бассейн Южный полюс—Эйткен на уровне самого внутреннего кольца многокольцевой структуры, расположенного в наиболее низменной части образования (по параллели -56°).

Согласно рис. 19 и рис. 20 отношение максимальной глубины депрессии к диаметру бассейна в среднем составляет аномально малую величину 0.003.

По классификации Бирна бассейн Южный полюс—Эйткен характеризуется числом (номером) 3. Если воспользоваться данными табл. 3, отношение “глубина—диаметр” для этой структуры также составляет весьма малую величину 0.003. Близкими к бассейну Южный полюс—Эйткен по этой характеристике структурами являются указанные в табл. 3 бассейны Балмер—Каптейн (число Бирна равно 8) и Крюгер—Сирсалис (число Бирна равняется 9). Для этих образований величина отношения “глубина—диаметр” составляет

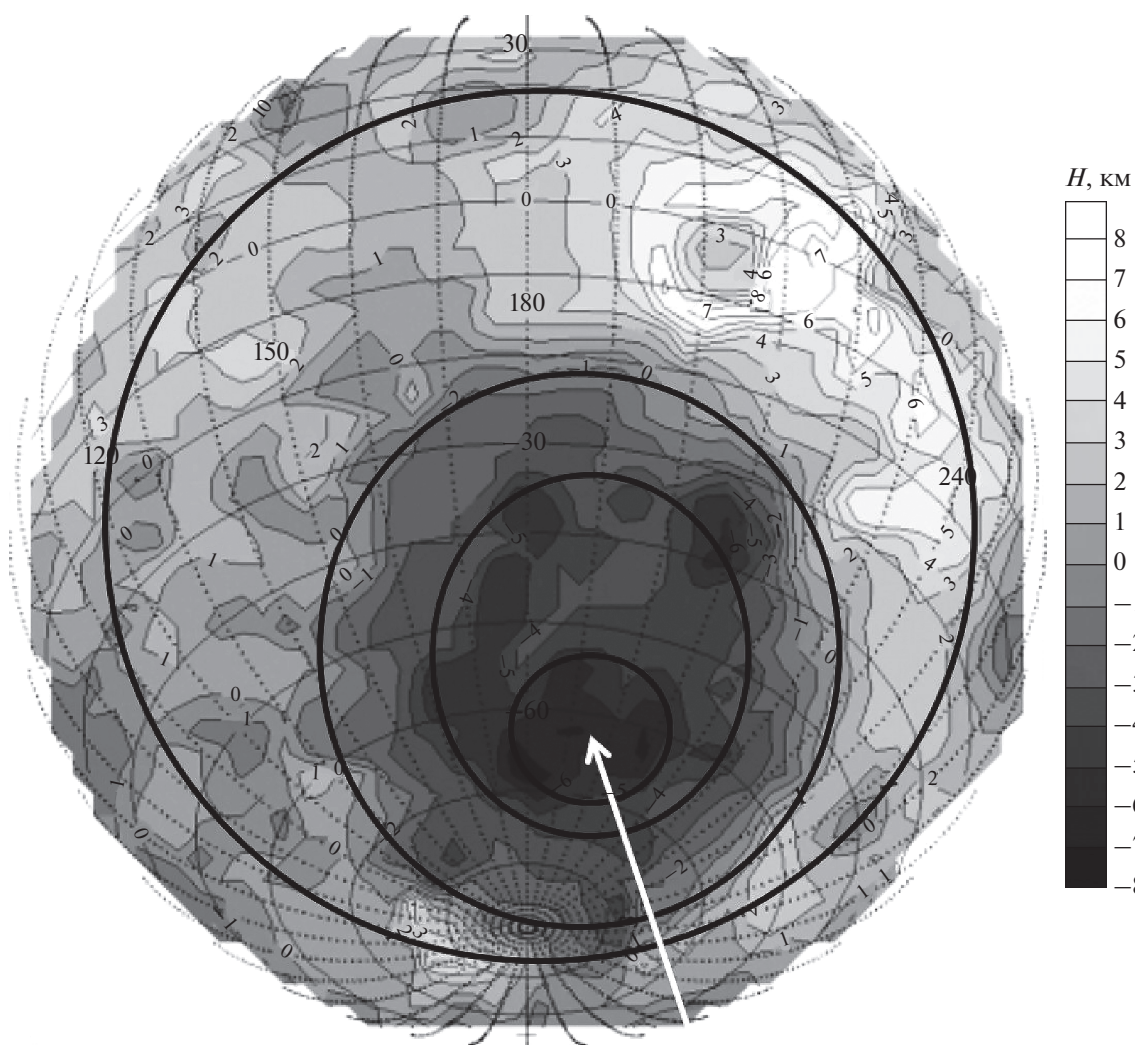


Рис. 18. Схема многокольцевой структуры бассейна Южный полюс–Эйткен, наложенная на карту высот обратного полушария, построенную в перспективной азимутальной ортографической проекции.



Рис. 19. Профиль бассейна Южный полюс–Эйткен по селенографическому меридиану 180°, с наложением наиболее близкого по геометрии схематического профиля структуры.

0.004. На рис. 21 показана зависимость значений отношения “глубина–диаметр” и чисел (номеров) Бирна для ряда структур, характеристики которых приведены в табл. 3.

Данные рис. 21 служат подтверждением результатов более ранних исследований Бирна (Birne, 2005; 2006), в которых содержится прямое указание на то, что ударник, образовавший бас-

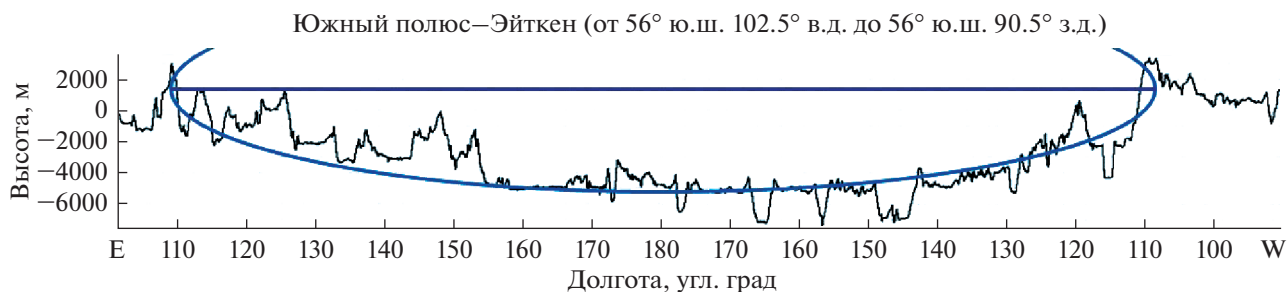


Рис. 20. Профиль бассейна Южный полюс—Эйткен в области внутреннего кольца, с наложением геометрически правильного профиля.

сейн Южный полюс—Эйткен, относился к иной популяции тел, нежели ударники, в результате падения которых возникли другие известные нам лунные бассейны.

В противоположность этим характеристикам, используя данные табл. 3, можно привести особенности бассейнов, согласно классификации Бирна имеющих более позднее происхождение. Например, бассейн Аполлон при числе Бирна, равном 41, характеризуется отношением “глубина—диаметр” 0.016. Такое же отношение “глубина—диаметр”, равное 0.016, имеет бассейн Королев при числе Бирна, равном 50. Бассейн Менделеев согласно данным табл. 3 имеет отношением “глубина—диаметр” 0.019 при числе Бирна 51. Бассейн Планк, имеющий такое же значение отношения “глубина—диаметр” — 0.019, характеризуется числом Бирна, равным 52. Таким образом, если график на рис. 21 продолжить в область более высоких значений чисел (номеров) Бирна, то полученная кривая вырождается в прямую на уров-

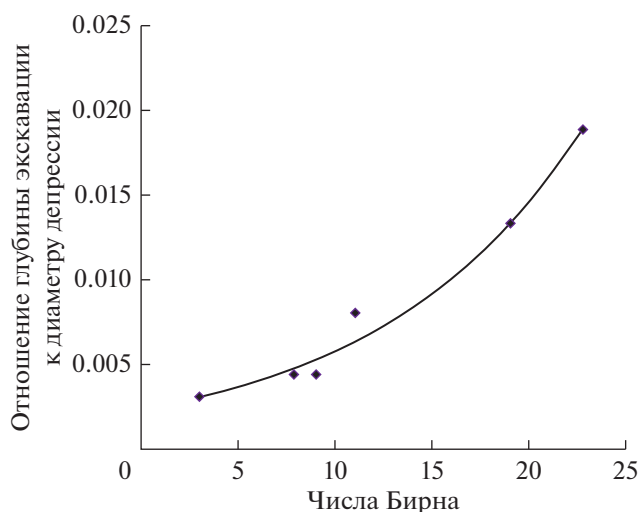


Рис. 21. Зависимость отношения глубины экскавации к диаметру депрессии от значений чисел (номеров) Бирна, которые характеризуют возраст образований.

не отношения величин “глубина—диаметр”, равных 0.016—0.019. Следовательно, эта особенность приведенной зависимости наглядно показывает, что образования по своим морфологическим характеристикам близкие к кольцевой структуре Южный полюс—Эйткен сформированы падением ударников иной природы.

Как было убедительно показано в работах О’Кифа и Аренса (O’Keef, Arens, 1980; 1982) уменьшение отношения “глубина—диаметр” в ударных структурах происходит при прочих равных условиях в результате уменьшения плотности вещества ударника.

В своем исследовании Шульц (Schultz, 1997) также предположил, что низкая плотность ударника может быть одной из причин anomalно малого значения отношения “глубина—диаметр”. Некоторые вопросы приложения этой теории к условиям формирования ударных структур на Луне также были изложены в работе Шевченко (Шевченко, 1999).

Принимая во внимание изложенные данные, можно предположить что ударник, образовавший депрессию бассейна Южный полюс—Эйткен также имел невысокую плотность — менее 2 г/см³.

Исходя из рассмотренных двух утверждений, можно сделать гипотетический вывод, что уникальные особенности природы бассейна Южный полюс — Эйткен и сходных с ним по морфологии кольцевых образований могут быть вызваны в результате удара тела кометного типа. В то же время следует обратить внимание, что весьма распространено представление о природе тел пояса Койпера как ядер неактивных комет большого размера.

Следует также упомянуть, что на преобладание объектов из Пояса Койпера или гигантских кометных тел из Облака Оорта среди основных типов ударников в предполагаемый период происхождения кольцевой структуры Южный полюс—Эйткен и схожих с ней мегаструктур было также указано в ряде исследований (Morbidelli, 1997;

1998; Murray, Holman, 1999; Fernandez, Gallardo, 1999; Schmitt, 2001).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере бассейнов, не заполненных лавой, можно видеть, что объекты, относящиеся к более раннему периоду образования, имеют такую существенную особенность, как значительно меньшее отношение первоначальной глубины (глубины экскавации) к диаметру депрессии.

К наиболее древним образованиям, несомненно, относится бассейн Южный полюс—Эйткен. Вместе с тем было выявлено определенное число мегакольцевых образований сходных по морфологии и, вероятно, по времени образования относящихся к тому же периоду. Это последнее обстоятельство вытекает из классификации Бирна, выраженной системой последовательных номеров (чисел).

С использованием симулятора ударных процессов на Луне, недавно разработанного Маркусом, Мелосом и др. (Marcus и др., 2017), нами было проведено поисковое моделирование. При рассмотрении различных моделей было установлено, что ударные структуры с отношением “глубина-диаметр” в пределах 0.003–0.005 образуются при падении на Луну ударников ледяного состава (модельная плотность вещества принималась равной 1.0 г/см³) со скоростью 60 км/с.

Таким образом, выполненные морфометрические исследования ударных кольцевых структур на Луне и их интерпретация позволяют предположить, что в раннюю эпоху эволюции лунной поверхности в период около 4.4–4.0 млрд лет основными ударниками были тела кометной природы из Пояса Койпера или из Облака Оорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гришакина Е.А., Лазарев Е.Н., Родионова Ж.Ф., Шевченко В.В. Гипсометрическая карта Луны 1 : 13000000. М.: ГАИШ МГУ, Географич. ф-т МГУ, 2014.
- Гришакина Е.А., Родионова Ж.Ф., Шевченко В.В., Слюта Е.Н. Обзорная карта Луны. М.: ГАИШ МГУ, ГЕОХИ РАН, 2018.
- Родионова Ж.Ф., Козлова Е.А. Морфологический анализ кратерированности бассейна Южный полюс—Эйткен на Луне. *Астрон.вестн.* 2000. Т. 34. № 5. С. 432–440. (Rodionova Zh.F., Kozlova E.A. Morphological Analysis of the Cratering of the South Pole—Aitken Basin on the Moon // *Sol. Syst. Res.* 2000. V. 34. № 5. P. 390–397.)
- Чуйкова Н.А., Родионова Ж.Ф., Максимова Т.Г., Гришакина Е.А. Анализ высот рельефа Луны и корреляционной связи рельефа с гравитационным полем; Предварительные выводы о глобальных плотностных неоднородностях коры Луны // *Астрон. вестн.* 2019. Т. 53. № 3. С. 174–184. (Chuikova N.A., Rodionova Zh.F., Maksimova T.G., Grishakina E.A. Analysis of Lunar Terrain Altitudes and Correlation Links between the Terrain and Gravitational Field; Preliminary Conclusions on the Global Density Inhomogeneities of the Lunar Crust // *Sol. Syst. Res.* 2019. V.53. № 3. P. 161–171.)
- Шевченко В.В. О кометном происхождении лунного льда // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. № 5. С. 456–465. (Shevchenko V.V. On the cometary origin on the lunar ice // *Sol. Syst. Res.* 1999. V. 33. № 5. P. 400–408.)
- Шевченко В.В., Чикмачев В.И., Пугачева С.Г. Структура лунного бассейна Южный полюс—Эйткен // *Астрон. вестн.* 2007. Т. 41. № 6. С. 1–16. (Shevchenko V.V., Chikmachev V.I., Pugacheva S. G. Structure of the South Pole—Aitken Lunar Basin // *Sol. Syst. Res.* 2007. V. 41. № 6. P. 447–462.)
- Barker M.K., Mazarico E., Neumann G.A., Zuber M.T., Haruyama J., Smith D.E. A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera // *Icarus.* 2016. V. 273. P. 346–355.
- Byrne C.J. Size distribution of the lunar basins // *Lunar and Planet. Sci.* XXXVI. 2005. #1260.
- Byrne C.J. The near side megabasin of the Moon // *Lunar and Planet. Sci.* XXXVII. 2006. #1930.
- Byrne C.J. The Far Side of the Moon. Photographic guide. London: Springer, 2008. 215 p.
- Byrne C.J. The Moon’s Largest Craters and Basins. Images and Topographic Maps from LRO, GRAIL, and Kaguya. London: Springer, 2016. 246 p.
- Fassett C.I., Head J.W., Kadish S.J., Mazarico E., Neumann G.A., Smith D.E., Zuber M.T. Lunar impact basins: Stratigraphy, sequence and ages from superposed impact crater populations measured from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data // *J. G. R.* 2012. V. 117. E00H06.
- Fernandez J.A., Gallardo T. From the Oort Cloud to Halley-Type Comets, *Proc. IAU Coll. 173: Evolution and Source Regions of Asteroids and Comets / Eds Svoren J. et al.* 1999. P. 327–338.
- Head J.W., III, Fassett C.I., Kadish S.J., Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., Mazarico E. Global distribution of large lunar craters: Implications for resurfacing and impactor populations // *Science.* 2010. V. 329. P. 1504–1507.
- Head J.W. Transition from complex craters to multi-ringed basins on terrestrial planetary bodies: Scale-dependent role of the expanding melt cavity and progressive interaction with the displaced zone // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L02203. <https://doi.org/10.1029/2009GL041790>
- O’Keef J.D., Arens T.J. Cometary impact calculations: flat floors, multirings and central peaks // *Lunar and Planet. Sci.* 1980. V. XI. Pt. 2. P. 830–832.
- O’Keef J.D., Ahrens T.J. Cometary and meteorite swarm impact on planetary surfaces // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. № B8. P. 6668–6680.
- Marcus R.A., Melosh H.J., Collins G.S. Our Impact Effects Calculator. http://down2earth.eu/impact_calculator/ (дата обращения 10.08.2017).
- Melosh H.J. *Impact Cratering: A Geologic Process.* New York: Oxford Univ. Press, 1989. 245 pp.
- Melosh H.J., Kendall J., Horgan B., Johnson B.C., Bowling T., Lucey P.G., Taylor G.J. South Pole—Aitken basin ejecta reveal the Moon’s upper mantle // *Geological Soc. of America.* 2017.

- Miljković K., Wieczorek M.A., Collins G.S., Laneuville M., Neumann G.A., Melosh H.J., Solomon S.C., Phillips R.J., Smith D.E., Zuber M.T.* Asymmetric distribution of lunar impact basins caused by variations in target properties // *Science*. 2013. V. 342. P. 724–726.
- Morbidelli A.* Chaotic diffusion and the origin of comets from the 2/3 resonance in the Kuiper belt // *Icarus*. 1997. V. 127. № 1. P. 1–12.
- Morbidelli A.* New Insights on the Kuiper Belt // *Science*. 1998. V. 280. № 5372. P. 2071–2073.
- Murray N., Holman M.* The Origin of Chaos in the Outer Solar System // *Science*. 1999. V. 283. № 5409. P. 1877–1881.
- Neumann G.A., Zuber M.T., Wieczorek M.A., Head J.W., Baker D.M.H., Solomon S.C., Smith D.E., Lemoine F.G., Mazarico E., Sabaka T.J., Goossens S.J., Melosh H.J., Phillips R.J., Asmar S.W., Konopliv A.S., Williams J.G., Sori M.M., Soderblom J.M., Miljkovic K., Andrews-Hanna J.C., Nimmo F., Kiefer W.S.* Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements // *Science Advances*. 2015. V. 1. Iss. 9, 1:e1500852 30 October 2015. P. 1–10.
- Pieters C.M., Besse S., Boardman J., Buratti B., Cheek L., Clark R.N., Combe J.P., Dhingra D., Goswami J. N., Green R.O., Head J.W., Isaacson P., Klima R., Kramer G., Lundeen S., Malaret E., McCord T., Mustard J., Nettles J., Petro N., Runyon C., Staid M., Sunshine J., Taylor L. A., Thaisen K., Tompkins S., Whitten J.* Mg-spinel lithology: A new rock type on the lunar farside // *JGR*. 2011. V. 116. E00G08. <https://doi.org/10.1029/2010JE003727>
- Pugacheva S.G., Shevchenko V.V., Chikmachev V.I.* Structure and morphology of the multiring lunar basins // *LPI Contributions*. 2008. V. 1423. P. 3029–3030.
- Scholten F., Oberst J., Matz K.-D., Roatsch T., Wählisch M., Speyerer E.J., Robinson M.S.* GLD100: The near-global lunar 100 m raster DTM from LROC WAC stereo image data // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. E00H17.
- Schultz P.H.* Forming the South Pole–Aitken Basin: The Extreme Games // *Lunar and Planet. Sci. Conf. XXVIII*. 1997. Abstract #1787.
- Schmitt H.H.* Source and implications of large lunar basin-forming objects // *Lunar and Planet. Sci.* XXXI. 2001. #1821.
- Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., Mazarico E., Lemoine F.G., Head J.W., III; Lucey P.G., Aharonson O., Robinson M.S., Sun X.L. et al.* Summary of the results from the lunar orbiter laser altimeter after seven years in lunar orbit // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 70–91.
- Spudis P.D.* *The Geology of Multi-Ring Impact Basins*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2005. 280 p.
- Sunshine J., Taylor L. A., Thaisen K., Tompkins S., Whitten J.* Mg-spinel lithology: A new rock type on the lunar farside // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. E00G08. P. 1–14. <https://doi.org/10.1029/2010JE003727>
- Tartèse R., Anand M., Gattacceca J. et al.* Constraining the Evolutionary History of the Moon and the Inner Solar System: A Case for New Returned Lunar Samples // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 215. № 54. P. 1–50.
- Wieczorek M.A., Phillips R.J.* Lunar multiring basins and the cratering process // *Icarus*. 1999. V. 139. P. 246–259.
- Wieczorek M.A., Neumann G.A., Nimmo F. et al.* The Crust of the Moon as Seen by GRAIL // *Science*. 2013. V. 339. P. 671–675.
- Wilhelms D.E., Oberbeck V.R., Aggarwal H.R.* Size frequency distributions of primary and secondary lunar impact craters // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th*. 1978. P. 3735–3762.