АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2021, том 55, № 2, с. 99–113

УДК 523

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИОРИТЕТНЫХ МЕСТ ПОСАДКИ МИССИИ ЛУНА-ГЛОБ

С. С. Красильников[a], *, А. Т. Базилевский[a], М. А. Иванов[a], А. С. Красильников[a]

[a]*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия*

**e-mail: krasilnikovruss@gmail.com*

Поступила в редакцию 17.07.2020 г.
После доработки 11.09.2020 г.
Принята к публикации 16.09.2020 г.

В работе представлен геоморфологический и геологический анализ поверхности трех основных и десяти запасных эллипсов посадки (15 × 30 км) российской автоматической научной станции Луна-Глоб (Луна-25). Ранее отобранные эллипсы посадки располагаются в секторе 65°–85° ю.ш. и 0°–60° в.д. южного полушария Луны. Геологическая характеристика эллипсов включает в себя анализ возраста поверхности и определение источников материала. Также были проведены анализы концентрации водного эквивалента водорода в секторе посадки и каменистости поверхности. Ограничения, такие как уклон поверхности и характеристика трассы подлета аппарата, использовались для приоритизации эллипсов с инженерно-технической точки зрения. По результатам исследования были определены наиболее предпочтительные эллипсы посадки: 1, 3, 4, 6 и 8. И наименее предпочтительные эллипсы: 5, 7, 9, 10, 11, а также Б1 и Б2.

Ключевые слова: Луна, Луна-Глоб, Луна-25, место посадки

DOI: 10.31857/S0320930X21010059

ВВЕДЕНИЕ

Для посадки космического аппарата (КА) Луна-Глоб (Луна-25) из инженерных соображений был выбран сектор в районе южного полушария Луны с координатами 65°–85° ю.ш. и 0°–60° в.д., который наилучшим образом удовлетворяет баллистическим ограничениям экспедиции и условием связи с Землей (Дьячкова и др., 2017). При выборе определенных эллипсов посадки в этом секторе должны учитываться две необходимые компоненты проводимой экспедиции, техническая и научная. К технической составляющей относится отработка технологии мягкой посадки и длительной работы в условиях полюса Луны. Научная составляющая зависит от главной научной задачи экспедиции и, соответственно, приборов, установленных на борту КА.

В настоящий момент можно выделить несколько наиболее значимых направлений в исследовании тел Солнечной системы, проводимых спускаемыми и орбитальными аппаратами: (1) анализ грунта для определения состава и возможного происхождения материнских пород; (2) поиск воды в приповерхностном слое грунта и на поверхности; (3) поиск сложных органических соединений и метана, позволяющих говорить о возможном наличие жизни на данном теле в прошлом или настоящем.

Приоритетным научным направлением экспедиции Луна-Глоб является анализ спускаемым аппаратом реголита в южной полярной области Луны, где по результатам нейтронной спектроскопии установлены области повышенного содержания водорода в реголите, что считается признаком существования льда (Feldman и др., 2001; Sanin и др., 2017; Иванов и др., 2017; Li и др., 2018).

Также с научной точки зрения крайне важным является геолого-геоморфологическое строение поверхности, что позволит ввести результаты анализа грунта в местный или даже региональный геологический контекст. Разнообразие рельефа даст значительно более полный результат для геологического анализа и позволит лучше изучить ударные и склоновые процессы в южной полярной области Луны. Наличие материала, выброшенного из-под покрова SPA, позволит проанализировать наиболее древние лунные породы.

Однако для безопасной посадки и успешной работы спускаемого аппарата в южный приполярный регион, имеющий сильно расчлененный рельеф, необходимо выполнение четырех основных инженерно-технических требований (Дьячкова и др., 2017).

1. Выбор подлетной орбиты: рельеф на подлете к месту посадки не должен создавать опасность столкновения с поверхностью.

2. Уклон поверхности в месте посадки не должен превышать 7°–10° на базе, сравнимой с поперечными размерами спускаемого аппарата (первые метры). Данное требование позволит избежать опрокидывания аппарата.

3. Продолжительность и устойчивость сеансов радиосвязи. Из-за большого объема передаваемой информации, исключительно важно обладать наибольшим периодом радиовидимости аппарата с Земли.

4. Угол падения лучей на верхнюю панель радиатора не должен превышать 20°, что позволит избежать перегрева аппарата. Продолжительность освещения аппарата должна составлять не менее 40% лунных суток. Условия освещенности сильно зависят от локальных уклонов и экспозиции в месте посадки, а также накладывают ограничение на географическую широту посадки – выше 65° ю.ш.

В работе Дьячкова и др. (2017) было предложено 11 эллипсов посадки и проведен их предварительный анализ с точки зрения соответствия техническим ограничениям. Ранжирование эллипсов от наиболее благоприятных к наименее благоприятным местам посадки производилось в работах (Дьячкова и др., 2017; Красильников и др., 2018). По совокупности технических параметров, основным эллипсом посадки выбран эллипс 1 с запасными эллипсами 4 и 6 (Дьячкова и др., 2017). В работах (Ivanov и др., 2015; Красильников и др., 2018) были проанализированы два эллипса в кратере Boguslawsky, рассматривавшиеся ранее как основные, Богуславский-1 (73.9° ю.ш.; 43.9° в.д., далее в тексте Б1) и Богуславский-2 (72.9° ю.ш.; 41.3° в.д., Б2) (рис. 1). В работе Ivanov и др. (2018) было проведено геологическое описание трех основных эллипсов посадки (1, 4 и 6). Восемь запасных эллипсов посадки (2, 3, 5, 7, 8, 9, 10 и 11, рис. 1) оставались не изученными с геологической точки зрения. Тем не менее, при возможной коррекции планов экспедиции Луна-Глоб, какие-то из этих эллипсов могут получить наивысший приоритет. Следовательно, для обоснованного выбора места посадки с научной и инженерной точек зрения, необходим геолого-морфологический анализ и эллипсов, считающихся до сих пор запасными.

Анализ запасных мест посадки КА основывается на данных, полученных следующими инструментами, установленными на КА Lunar Reconnaissance Orbiter. (1) Оптических камер WAC (Wide Angle Camera) с разрешением 100 м/пикс и NAC (Narrow Angle Camera) с разрешением 0.5–1.0 м/пикс (Robinson и др., 2010). Эти данные составляли основу для фотогеологического анализа области исследования; (2) лазерного высотомера LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter), по замерам которого была построена топографическая карта с пространственным разрешением 60 м/пикс в области нашего исследования (Smith и др., 2010); (3) нейтронного детектора LEND (Lunar Exploration Neutron Detector) с номинальным пространственным разрешением 10 км (Mitrofanov и др., 2010). Эти данные позволяют оценивать содержание водорода в верхнем слое реголита мощностью примерно 1 м; (4) и инфракрасного радиометра Diviner, данные которого позволяют оценивать модельную степень каменистости поверхности, что важно для оценки риска, связанного с посадкой в том или ином месте (Paige и др., 2010).

С использованием этих данных в нашем исследовании мы провели анализ рельефа на подлетных траекториях, геологическое картирование всех эллипсов, установили потенциальные источники материала, накопившегося и перемещавшегося в пределах эллипсов, установили частотное распределение уклонов и провели анализ частотно-размерного распределения камней и кратеров в пределах запасных посадочных эллипсов.

АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА НА ТРАЕКТОРИЯХ ПОДЛЕТА К ПОСАДОЧНЫМ ЭЛЛИПСАМ

Для анализа рельефа на трассе подлета посадочного аппарата использовались цифровые модели рельефа (ЦМР), построенные по данным LOLA. Ширина сектора исследования равна максимальной ширине посадочного эллипса (15 км), а ее длинна – 200 км. Для сектора посадки был рассчитан усредненный профиль поверхности.

Трассы подлета аппарата можно разделить на два класса – с незначительным и с значительными перепадами высот относительно средней высоты эллипса посадки. К первому классу относятся эллипсы 5, 7, 8 и 11. Ко второму – эллипсы 2, 3, 9, 10, Б1 и Б2. Эллипсы первого класса располагаются на сравнительно ровной поверхности выбросов из ударных кратеров (5, 7, 8), либо борт кратера выражен незначительно (эллипс 11). Все эллипсы второго класса находятся на днище ударных кратеров, борт которых, расположенный в непосредственной близости от места посадки может представлять угрозу при снижении аппарата. Полученная информация должна приниматься во внимание при произведении посадки, так как аппарат может зацепиться за высокие выступы при очень пологом снижении, однако не должна быть лимитирующем фактором при выборе места, поскольку окончательная траектория посадки будет рассчитываться перед запуском аппарата.

ОЦЕНКИ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ ЛЬДА В СЕКТОРЕ РАБОТЫ ЭКСПЕДИЦИИ ЛУНА-ГЛОБ

Анализ данных прибора LEND (Sanin и др., 2017) в пределах всех выбранных эллипсов посад-

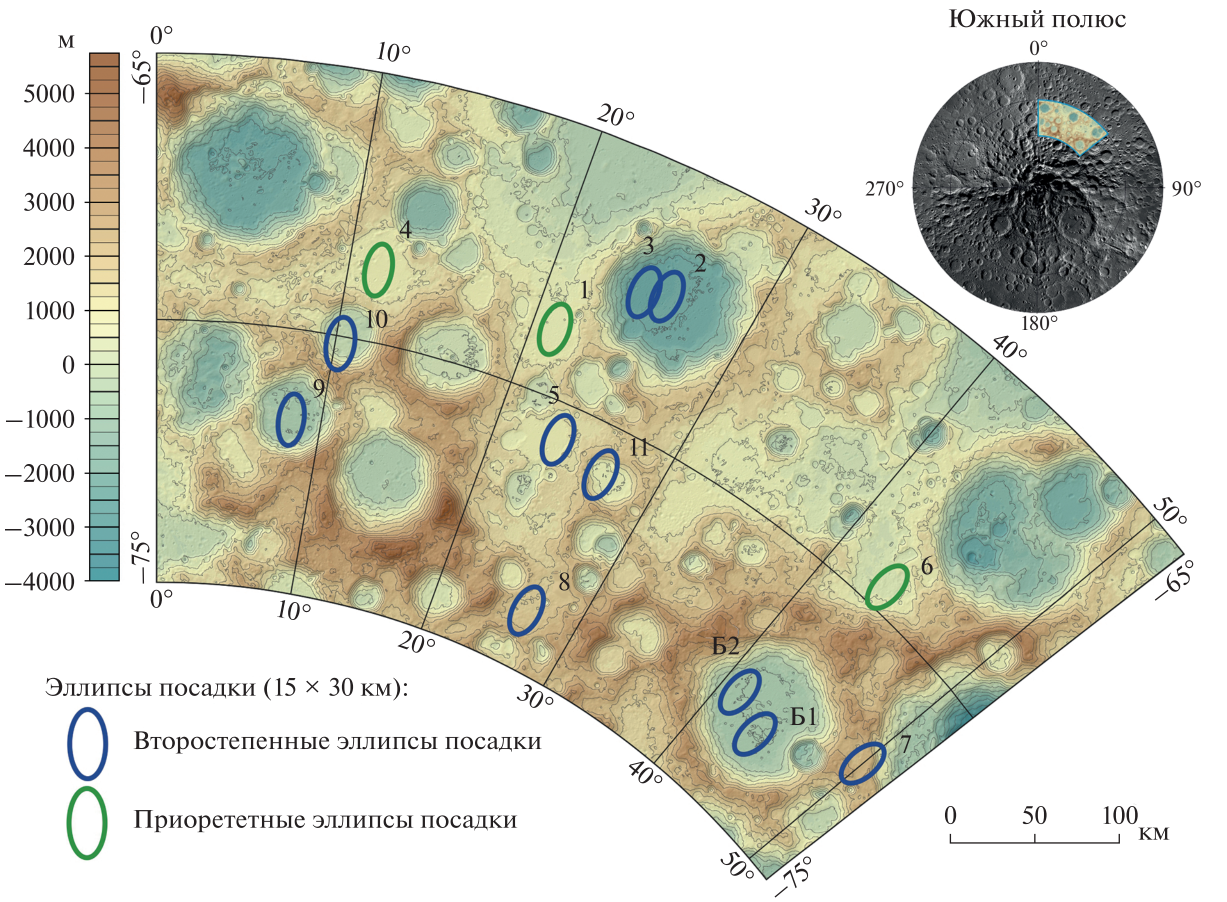

Рис. 1. Предполагаемые эллипсы посадки Луна-Глоб (Луна-25). Основные эллипсы – 1, 4, 6 и запасные – 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11 и Б1, Б2.

ки позволил установить характер вариаций водного эквивалента водорода (WEH) в приповерхностном (~1 м) слое реголита (рис. 2). Наибольшая концентрация WEH наблюдается в эллипсах 7 и 10, где средние значения WEH составляют 0.19 ± ± 0.02 (здесь и далее 1σ) и 0.14 ± 0.01 мас. % соответственно. Наименьшие значения WEH характеризуют эллипсы 5 (0.07 ± 0.02 мас. %), 9 (0.06 ± ± 0.02 мас. %) и Б-1 (0.01 ± 0.01 мас. %), в посадочном эллипсе Б-2 значения WEH ниже предела обнаружения. Таким образом, измеренные значения водного эквивалента водорода указывают на то, что по этому признаку наибольшим приоритетом пользуются эллипсы 7 и 10. Следует, однако, иметь в виду, что эти оценки основаны на измерениях LEND с пространственным разрешением 10 км, и, концентрация льда в реголите в пределах такого пиксела могут сильно варьировать. Поэтому приоритетность эллипсов по параметру WEH, несомненно, имеет не абсолютный, а вероятностный характер. На следующем этапе исследования необходимо ранжировать эллипсы по их инженерным особенностям и охарактеризовать их геологическое строение.

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЛИПСОВ ПОСАДКИ

Геолого-геоморфлогическое описание эллипсов посадки включает в себя анализ уклонов по данным LOLA и NAC, каменистости по данным Diviner, кратерной статистики и плотности кратеров, а также геологического строения по данным LOLA и LROC.

Уклоны поверхности в эллипсах посадки

Процентное отношение различных категорий уклонов (<7°, 7°–10°, 10°–15°, 15°–20° и >20°) поверхности (Красильников и др., 2018) было рассчитано по данным LOLA с разрешением 60 м/пикс. Наибольшая концентрация критических уклонов (более 10°) наблюдается в эллипсах 7, 10 и 11, а наиболее ровный рельеф – в эллипсах 2, 3 и 5. Для определения уклонов на базе размаха опор посадочного аппарата (~3.5 м) требуются дополнительные исследования, основанные на определении доли площади поверхности, занятой тенью на снимках NAC в зависимости от высоты Солнца

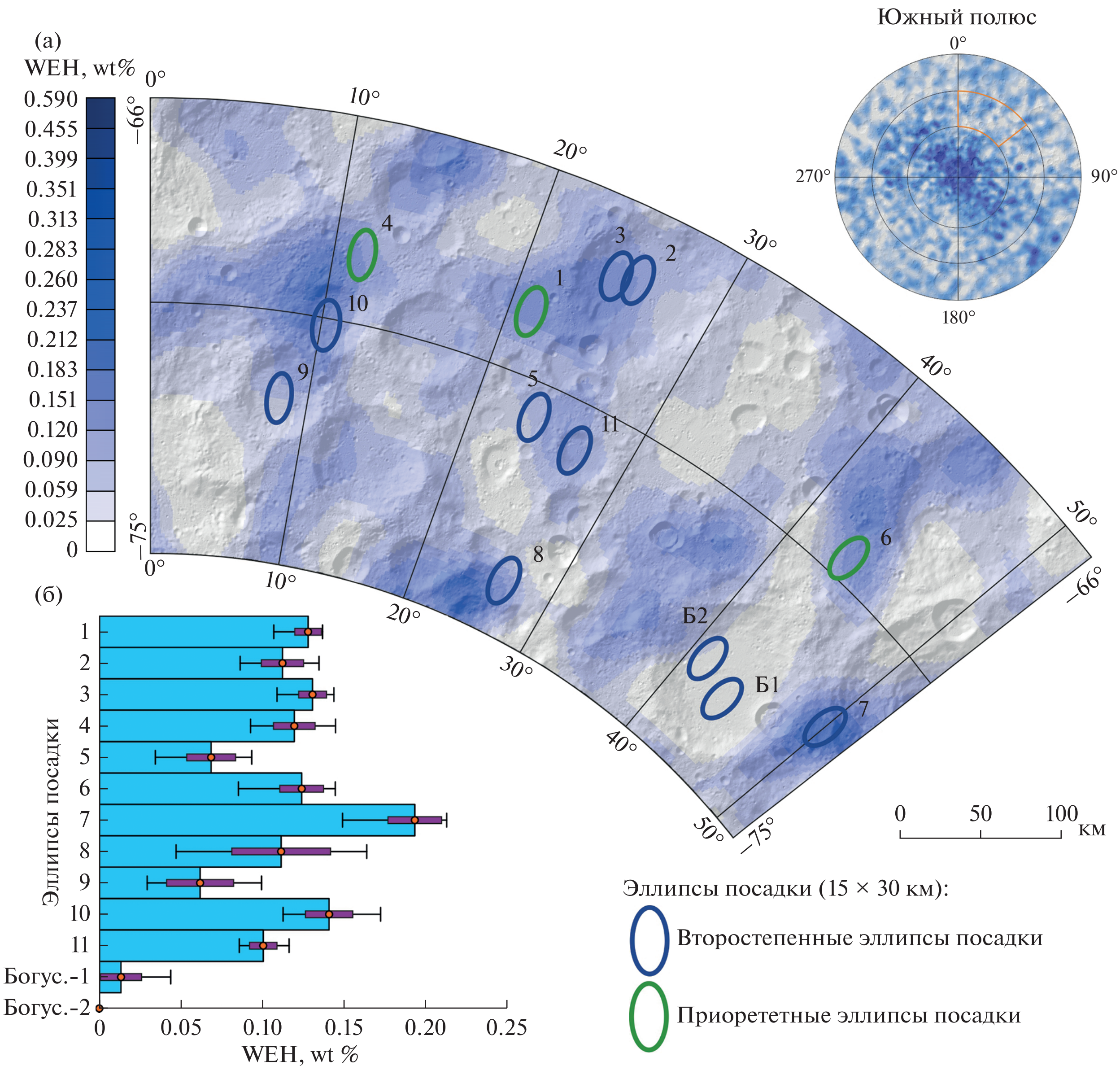

Рис. 2. (а) Карта значений водного эквивалента водорода (WEH) в секторе работы экспедиции Луна-Глоб по (Sanin и др., 2017). Показаны посадочные эллипсы, а на врезке показаны колебания средних значений WEH для каждого эллипса. (б) усредненные значения WEH по эллипсам посадки с 1 σ и дисперсией.

(Абдрахимов и др., 2015). Этот метод был использован для определения уклонов на базе спускаемого аппарата в основных (1, 4 и 6) и запасных (Б-1, -2) посадочных эллипсах работе Красильников и др., (2018). Сравнивая полученные результаты с предыдущими исследованиями на базе данных LOLA (Дьячкова и др., 2017), можно наблюдать разницу в уклонах меньше <7° в несколько процентов, что по всей видимости, связано с различием в методах обработки данных.

При сравнении результатов оценки уклонов, полученных по снимкам NAC и LOLA для эллипсов 1, 4, 6 и Б-1, 2, обнаруживается заметное увеличение уклонов выше 10°, при расчете при помощи метода теней (Красильников и др., 2018). Это ожидаемый результат, связанный с тем, что метод теней при разрешении используемых снимков 0.5–1 м/пикс приводит к оценке распространенности уклонов на базе нескольких метров, а на карте с пространственным разрешением 60 м/пикс эти уклоны на малой базе сглаживаются и оценка вероятности встречи опасного уклона занижается (табл. 1).

Анализ каменистости поверхности

В пределах исследуемых эллипсов не обнаружено значительной концентрации камней. Анализ каменистости проводился при помощи дан-

Таблица 1. Распределение уклонов по категориям для основных и запасных эллипсов посадки. Доля уклонов по данным LROC NAC рассчитывалась только для эллипсов 1, 4, 6 и Б1, Б2 в работах Красильников и др. (2018) и Абдрахимов и др. (2015) соответственно

Номер эллипса	Данные по LOLA							Данные по LROC NAC
	среднее значение уклонов, градусы	<7°	7°–10°	10°–15°	15°–20°	>20°	доля поверхности с уклоном >10°	доля поверхности с уклоном >10°
1	3.57	89.69	7.36	3.19	0.72	0.24	4.15	26
2	2.99	92.89	4.55	2.91	1.40	0.40	4.71	–
3	2.72	95.00	4.44	2.14	0.42	0.10	2.66	–
4	4.03	86.03	8.91	4.74	1.50	0.11	6.34	23
5	3.78	86.47	8.33	3.84	0.87	0.49	5.20	–
6	4.62	83.23	12.19	5.00	0.27	0.00	5.28	17
7	8.77	51.31	18.69	11.50	6.96	10.68	29.13	–
8	5.11	77.20	15.24	4.65	0.49	0.69	5.83	–
9	4.67	79.11	10.22	7.51	2.02	0.55	10.07	–
10	7.98	55.75	12.77	16.03	11.38	4.40	31.81	–
11	8.75	41.89	16.96	24.89	14.79	1.33	41.01	–
Б1	2.9	92.38	4.02	1.78	0.35	0.04	2.17	15
Б2	2.62	93.98	3.80	0.88	0.09	0.01	0.98	18

ных теплового инфракрасного радиометра Diviner и анализа снимков высокого разрешения LROC NAC. Данные радиометра позволяют измерять тепловую инерцию поверхности, которая в свою очередь позволяет оценивать модельную концентрацию камней. Камнями в эксперименте Diviner считаются объекты на поверхности с тепловой инерцией не менее 1570 J m^{-2} K^{-1} $s^{-1/2}$ при 200 K, а результаты определения степени каменистости (доля площади, покрытой каменными фрагментами) приводится для пикселя размером примерно 237 м (Bandfield и др., 2011).

Для всех эллипсов наблюдаются низкие значения общей каменистости поверхности. Распределение камней имеет фрагментарный характер, увеличение количества камней приурочено к более свежим малым кратерам (100–1000 м), поэтому в работе имеет смысл рассматривать максимальные, а не средние значения каменистости (рис. 3). Большинство эллипсов показало низкие значения максимальной каменистости, не превышающие ~0.02% камней от общей площади поверхности пикселя. Некоторое увеличения максимальной каменистости поверхности наблюдается для эллипсов 2 (0.036%), 3 (0.028%) и Б2 (0.05%).

Места распространения камней были исследованы при помощи снимков высокого разрешения NAC с максимальным разрешением до 0.5 м/пикс. Для мест, где по данным Diviner отмечены повышенные значения каменистости (рис. 4, А1, Б1), характерно присутствие россыпей камней (рис. 4, А2, Б2). Большинство камней имеет размер до 2 м в диаметре, однако отдельные камни достигают 5 м в поперечнике. В работе Демидов и Базилевский (2014), было установлено, что характерное среднее отношение высоты (h) к диаметру камней (d) для Луны составляет около 0.5, следовательно, среднее значение высоты камней в рассматриваемых кратерах (рис. 4) достигает 1 м, а максимальная высота приближается к 2.5 м. В сочетании с уклонами >10° на стенках, такие кратеры могли бы представлять значительную угрозу для посадки КА. Однако вероятность посадки аппарата в такой кратер крайне мала и не превышает 2.7, 0.6 и 0.3% для наиболее "каменистых" эллипсов 2, 3 и Б-2, соответственно. Для остальных эллипсов вероятность встречи аппаратом крупных камней еще меньше.

Кратерная статистика и плотность кратеров

Определение возраста территории проводилось при помощи кратерной статистики. В зависимости от диаметра кратеров, в исследовании применялись различные подходы в анализе кратерной статистики. Кратеры более 1 км в диаметре не имеющие ярко выраженных выбросов изображаются на геолого-геоморфологических картах эллипсов посадки по границе различимого вала. Кратеры с хорошо выраженными выбросами составляют отдельные геолого-геоморфологические подразделения "c" (описание геоморфологических подразделений дано в следующем разделе).

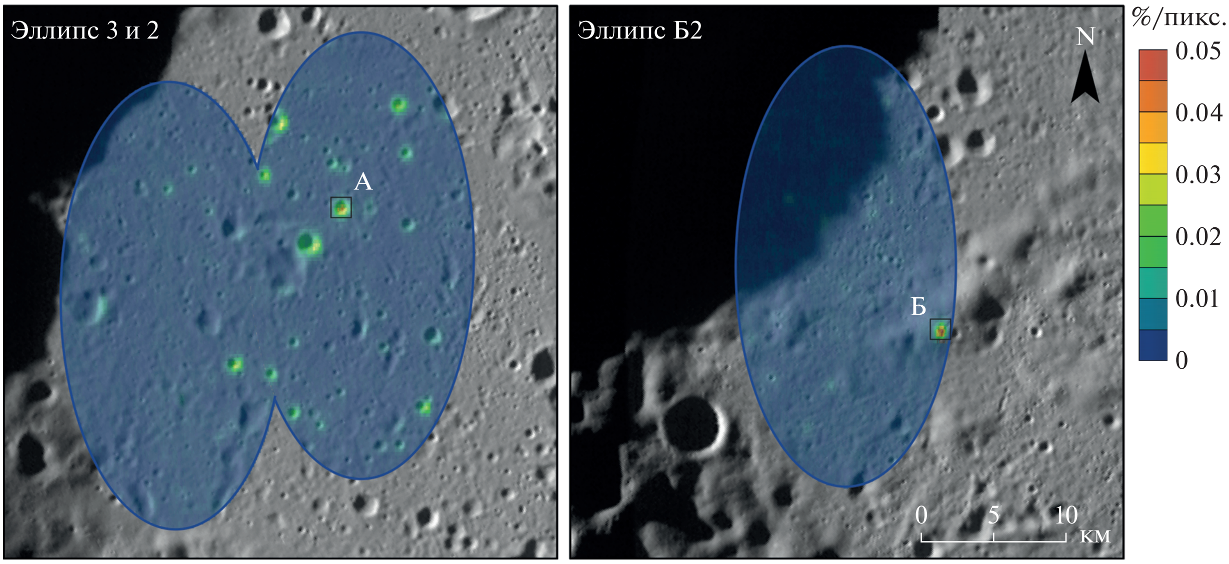

Рис. 3. Анализ каменистости поверхности при помощи теплового инфракрасного радиометра Diviner. Показаны эллипсы с наибольшим процентом поверхности занятой камнями (до 0.05%) от площади одного пикселя (237 м^2).

Кратеры, диаметром 100–1000 м не обозначаются на картах, однако включены в описание геоморфологических подразделений, где указана их низкая (0.6 кратеров на 1 км^2), средняя (0.72 на 1 км^2) и высокая плотность (1.03 на 1 км^2). Для геолого-геоморфологических подразделений определялась плотность малых кратеров 3–100 м в диаметре. Определение плотности проводилось на участках 0.125 км^2 с пересчетом до плотности на 0.1 км^2. Количество малых кратеров имеет слабую связь с возрастом поверхности и, в основном, зависит от рельефа местности (табл. 2). Так в пределах пологоволнистой равнинной поверхности “p” можно встретить наибольшее количество малых кратеров. При увеличении уклонов поверхности на холмах “h” и пологосклонных холмах “sh” плотность малых кратеров уменьшается, очевидно из-за их разрушения при движении реголита по склонам.

Геология поверхности

В пределах исследуемых эллипсов основное преобразование поверхности происходило при формировании бассейна Южный Полюс–Эйткен (SPA) и больших ударных структур донектарианского (pN), нектарианского (N) и имбрийского (I) возраста. В работе Ivanov и др. (2018) была рассчитана мощность выбросов из ударных кратеров в исследуемом регионе: SPA – 3.18 ± 0.96 км (96%); pN – 0.10 ± 0.03 км (2.9%); N – 0.02 ± 0.00 км (0.7%); I – 0.01 ± 0.00 км (0.4%). Ударные события, которые привели к образованию донектарианских кратеров Boguslawsky, Boussingault, Manzinus и Simpelius (pN возраст), нектарианского кратера Boussingault A (N), и имбрийских кратеров Moretus и Schomberger (I), также оказывали значительное влияние на исследуемую территорию за счет образования вторичных кратеров и перекрытия поверхности выбросами. Одной из наиболее важных геологических задач, было определение вероятности встречи на поверхности исследуемых эллипсов, древнего донектарианского материала, расположенного под покровом SPA. Данные породы могли попасть на поверхность в результате экскавации материала при пробитии выбросов SPA. Глубина экскавации рассчитыва-

Таблица 2. Количество малых кратеров на геолого-геоморфологических подразделениях

Геоморфологическое подразделение	Количество малых кратеров на 0.1 км^2 в подразделениях разного возраста			
	pN	N	I	E
p	770	–	860	–
pc	653, 579	–	679	742
rp	631	644	698	–
sh	682	–	379, 695	689
h	–	–	594	–

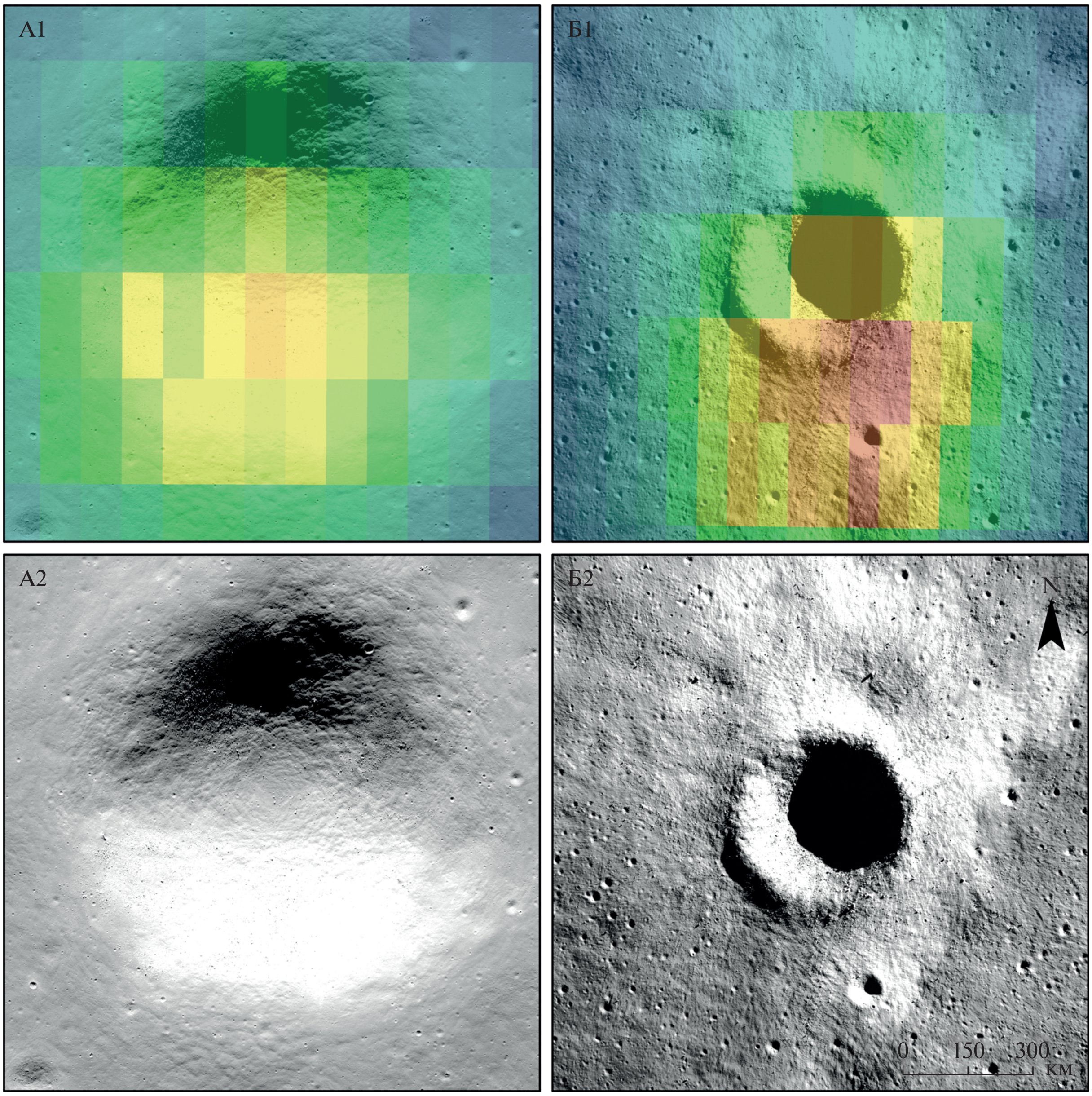

Рис. 4. Снимки NAC (А2, Б2), показывающие области с высокой концентрацией камней по данным Diviner (А1, Б1). Расположение участков А и Б показано на рис. 3.

лась для всех вероятных источников материала вокруг исследуемых эллипсов на основе модели кратерообразования по Melosh (1989) и составляла 1/10 глубины кратера к диаметру. Для расчета мощности выбросов бассейна SPA использовалась модель Housen и др. (1983). Модели Melosh (1989) и Housen и др. (1983) показали, что основная часть кратеров, выбросы которых находятся в исследуемых эллипсах, пробили покров SPA.

Для каждого из эллипсов была проведена оценка мощности выбросов, перекрывающих их поверхность. В зависимости от типа и размера кратера, использовались модели Sharpton (2014) или Housen и др. (1983), для кратеров до 45 км в диаметре или более, соответственно. В дополнение к модельной оценке было проведено топографическое профилирование предполагаемых границ выбросов, которое показало несоответствие в некоторых случаях модельной мощности выбросов с измеряемой разницей высот окружающей поверхности и выбросов. Это связано с тем, что верхние части покрова выбросов не полностью определяют наблюдаемый рельеф, а перекрывают подстилающую поверхность и смешиваются с подстилающим реголитом.

Фотогеологический анализ снимков NAC, WAC и топографический анализ ЦМР, позволили составить детальные геолого-геоморфологические

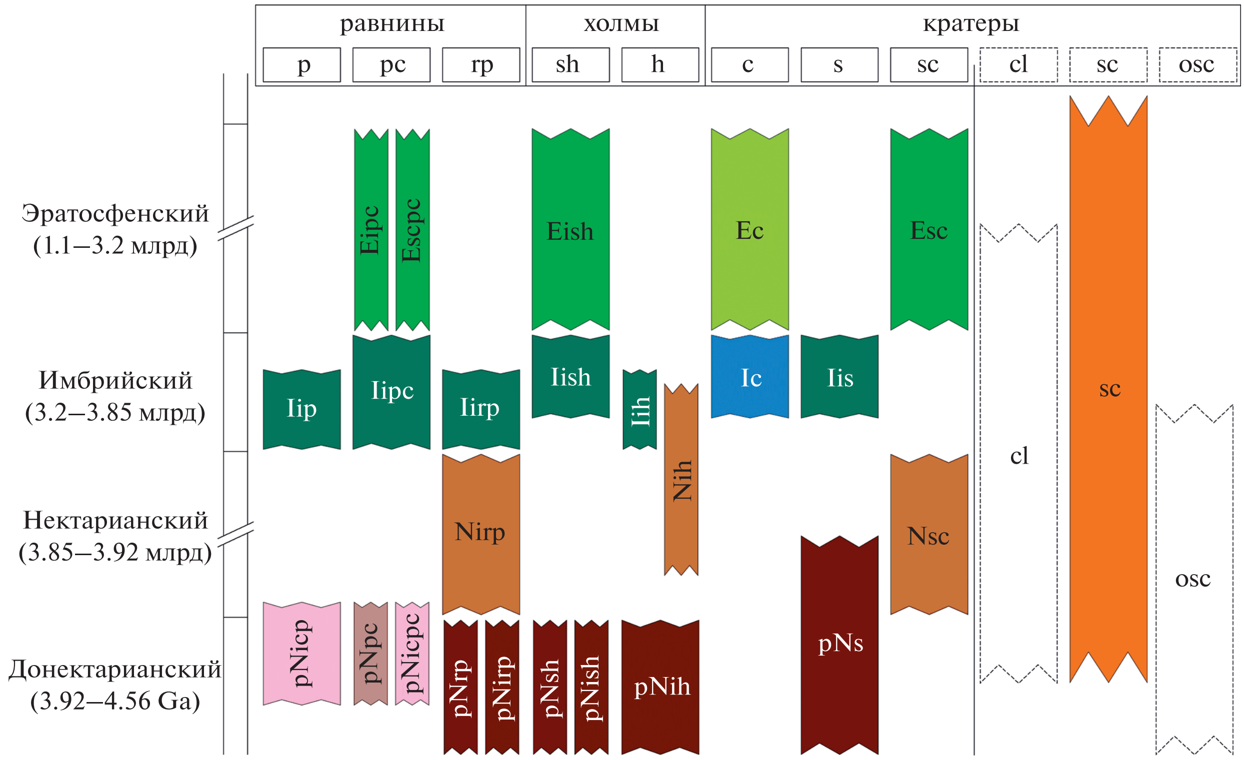

Рис. 5. Корреляционная схема вещественных комплексов, отмеченных на геолого-геоморфологических картах для эллипсов посадки.

карты исследуемых эллипсов в масштабе 1 : 100000. Стратиграфическая принадлежность морфологических подразделений, показанных на картах, устанавливалась с использованием региональных геологических карт южной полярной области Луны (Wilhelms, McCauley, 1979; Ivanov и др., 2018).

На картах эллипсов цвет и заглавные буквы показывают стратиграфический возраст, прописными буквами показан морфологический тип поверхности (рис. 6 и 7–13). К ним относятся следующие индексы: “p” – пологоволнистая равнинная поверхность с низкой плотностью кратеров и уклонами менее 10°; “pc” – кратерированная пологоволнистая равнина со средней или высокой плотностью малых (100–1000 м) кратеров; “rp” – холмисто-западинная равнина с низкой или средней плотностью кратеров; “sh” – пологосклонные холмы, с незначительным перепадом высот и низкой либо средней плотностью кратеров; “h” – холмы с уклонами до 20° и разницей высот до ~300 м с низкой плотностью кратеров; “s” – склоны кратеров с оползнями или перекрытые последующими выбросами; “c” – кратеры среднего размера (от одного до нескольких километров в диаметре), для которых можно выделить зону выбросов; “sc” – цепочки и поля вторичных кратеров; “cl” – оползни, преимущественно на склонах кратеров; “osc” – частично перекрытые цепочки и поля вторичных кратеров; индексом “i” показаны геоморфологические подразделения, сложенные выбросами из ударных кратеров (рис. 5 и 6–12).

В этой работе мы не рассматривали геологическое и геоморфологическое строение основных эллипсов посадки 1, 4 и 6, а также эллипсов в кратере Boguslawsky, описанных в работе Ivanov и др. (2015; 2018).

Эллипсы 2 и 3 (67.48° ю.ш., 24.61° в.д. и 67.37° ю.ш., 24.70° в.д., соответственно) располагаются на дне кратера Manzinus (рис. 6). Общий перепад высот в пределах эллипса 2 составляет ~100 м, а общий наклон поверхности, направленный на север, составляет ~0.19°. Перепад высот в пределах эллипса 3 составляет ~80 м с общим наклоном поверхности на север (~0.21°). Для данных эллипсов наблюдается незначительное увеличение показателей каменистости в нескольких кратерах эратосфенского – коперниковского возраста. Основная часть уклонов выше 10° относится именно к этим кратерам (~1–2 км в диаметре). В пределах эллипсов 2 и 3 было выделено четыре основных геоморфологических подразделения. Подразделение pc (pNicpc) занимает 69.1% территории обоих эллипсов и представляет собой кратерированную слабоволнистую поверхность с преимущественно малыми кратерами (до 500 м), расположенную на дне крупного кратера Manzinus (96 км в диаметре) донектарианского возраста. Кратер Manzinus обла-

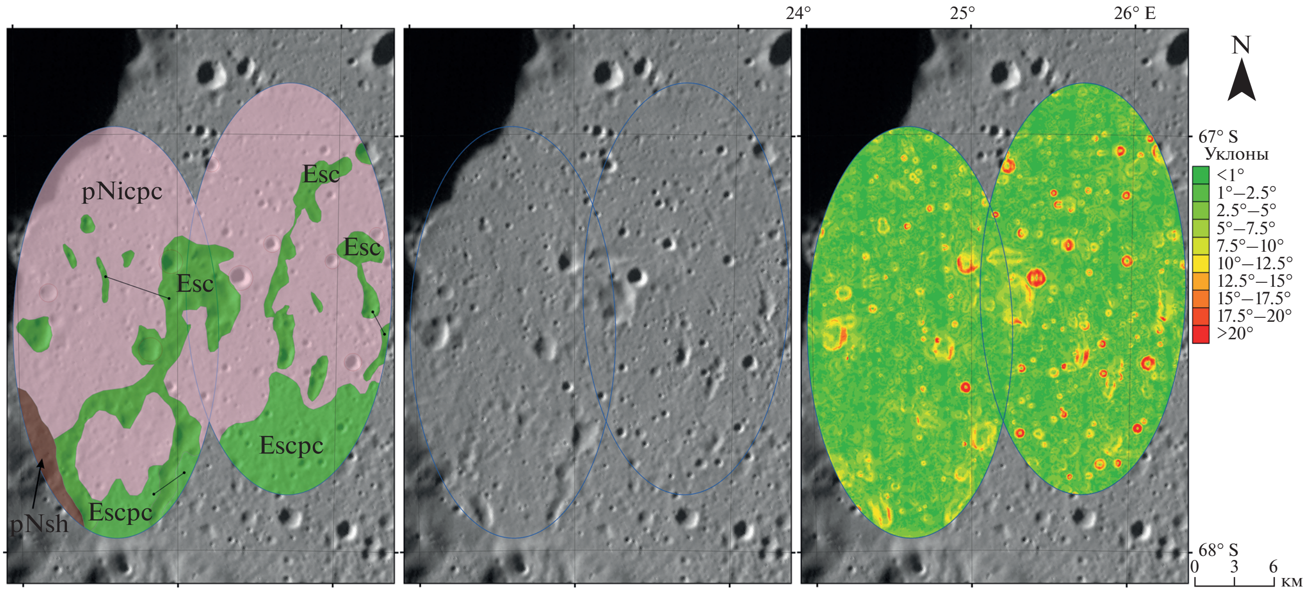

Рис. 6. Эллипсы посадки 2 и 3.

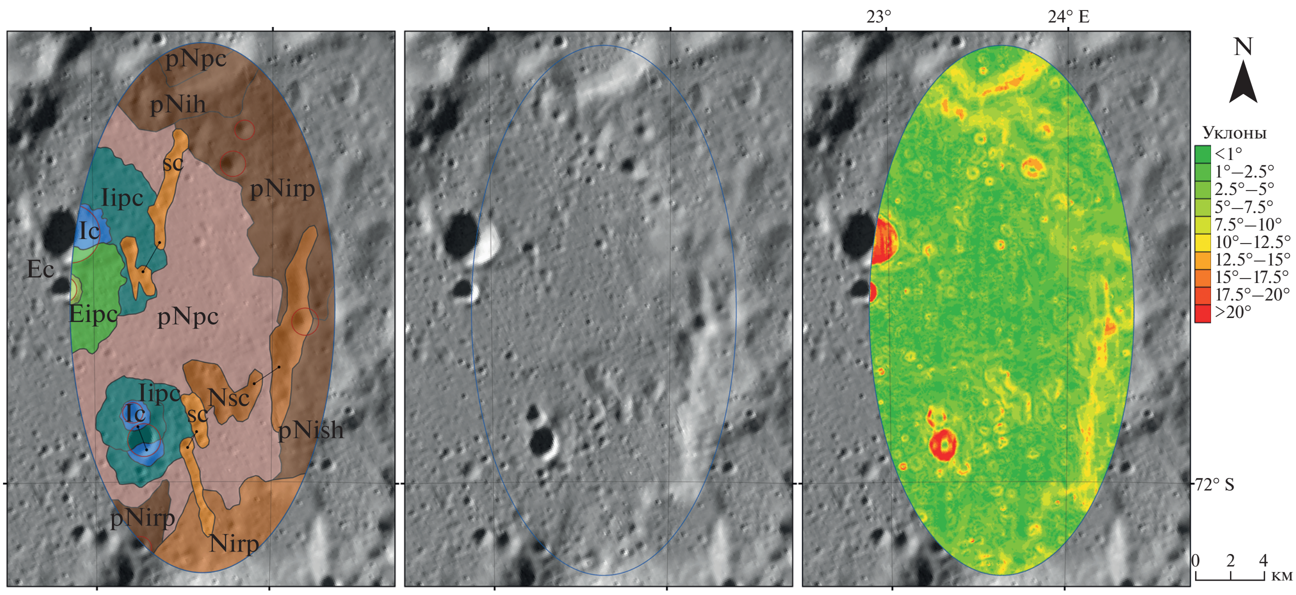

Рис. 7. Эллипс посадки 5.

дает достаточным размером, чтобы пробить выбросы SPA, что означает возможность нахождения древнего донектарианского материла, предшествовавшего SPA, в подразделении pNicpc. Подразделение sc (Esc) занимает 17.7% обоих эллипсов и представляет собой вытянутые понижения или цепи вторичных кратеров, образованных выбросами из кратера Manzinus E (68.98° ю.ш., 24.72° в.д., диаметром 18 км) эратосфенского возраста. Выбросы из кратера Manzinus E формируют также подразделение pc (Escpc) кратерированную слабоволнистую равнину на юге эллипсов (11.4% от двух эллипсов). Мощность выбросов Manzinus E в пределах эллипсов не превышает нескольких метров. Внутренний склон кратера Manzinus образует подразделение слабонаклонных холмов h (pNsh) в юго-западной части Эллипса 3 и занимает 1.8% общей территории.

В пределах Эллипса 5 (70.68° ю.ш., 23.63° в.д.) было выделено 12 геолого-геоморфологических подразделений (рис. 7). Уклоны больше 15° приурочены к сравнительно молодым кратерам им-

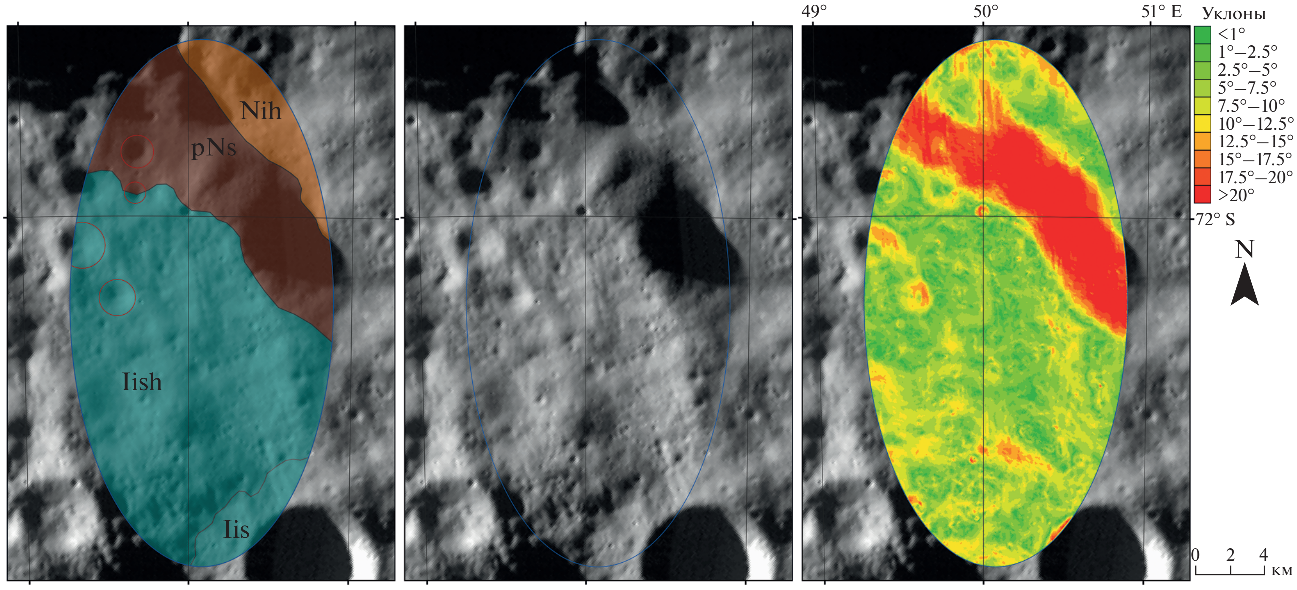

Рис. 8. Эллипс посадки 7.

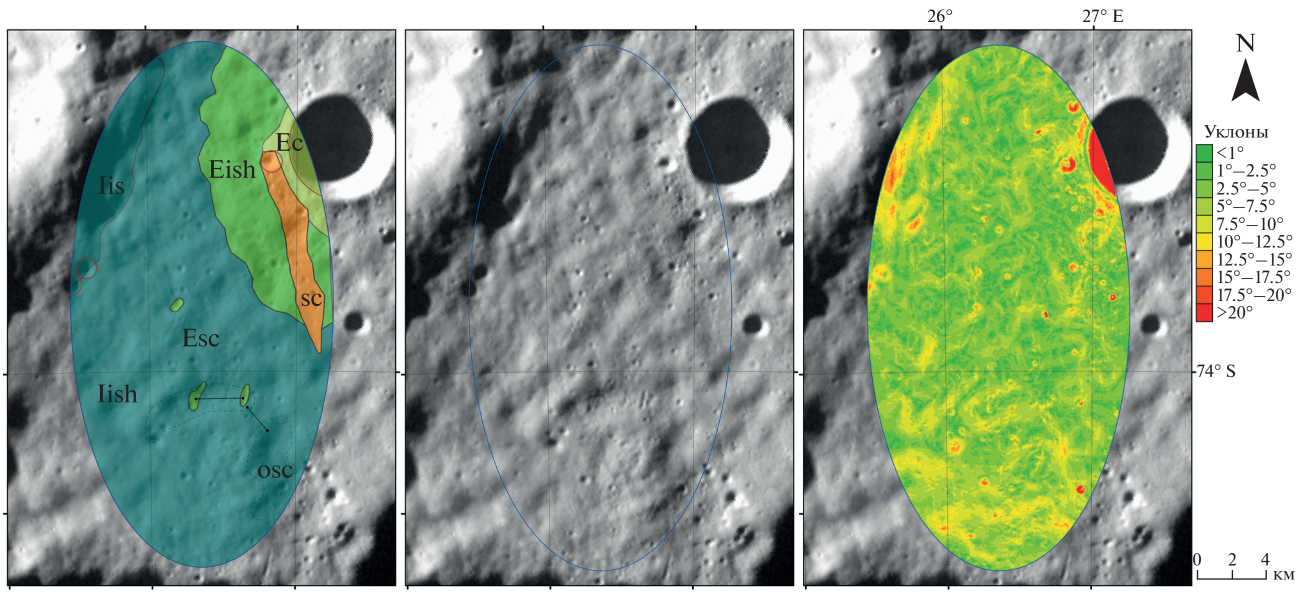

Рис. 9. Эллипс посадки 8.

брийского и эратосфенского возраста. Основная часть поверхности относится к донектарианскому возрасту и представляет собой подразделение pc (pNpc), кратерированную равнину, которая занимает 36.2% территории. В восточной и северо-восточной части эллипса располагаются выбросы из кратера Boguslawsky C (pN) (70.99° ю.ш., 27.7° в.д., диаметром 34 км) с различными типами рельефа: sh (pNish) 5% и rp (pNirp). Данный кратер является единственно возможным источником донектарианского материала, предшествовавшего SPA, для этого эллипса. Этот материал можно будет найти в предполагаемых выбросах кратера Boguslawsky C и на равнине pNpc. Местность с типом рельефа rp (pNirp), располагается в юго-западной части эллипса и относится к кратеру Simpelius G (71.78° ю.ш., 22.76° в.д., диаметром 22 км). Общая площадь этих подразделений составляет 17.7% поверхности эллипса. В северной части эллипса расположены выбросы из кратера Manzinus C (pN, 69.99° ю.ш., 21.68° в.д., диаметром 24 км), образующие два геоморфологических подразделения: кратерированную равнину pc (pNipc) 1.7% площади эллипса и вытянутую гряду h 5.7% пло-

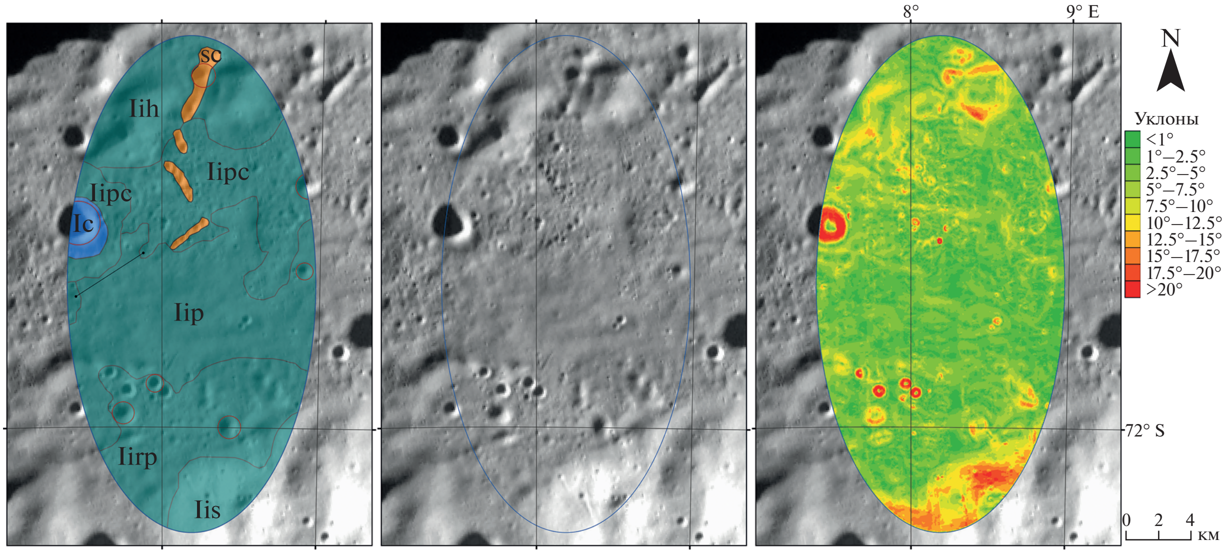

Рис. 10. Эллипс посадки 9.

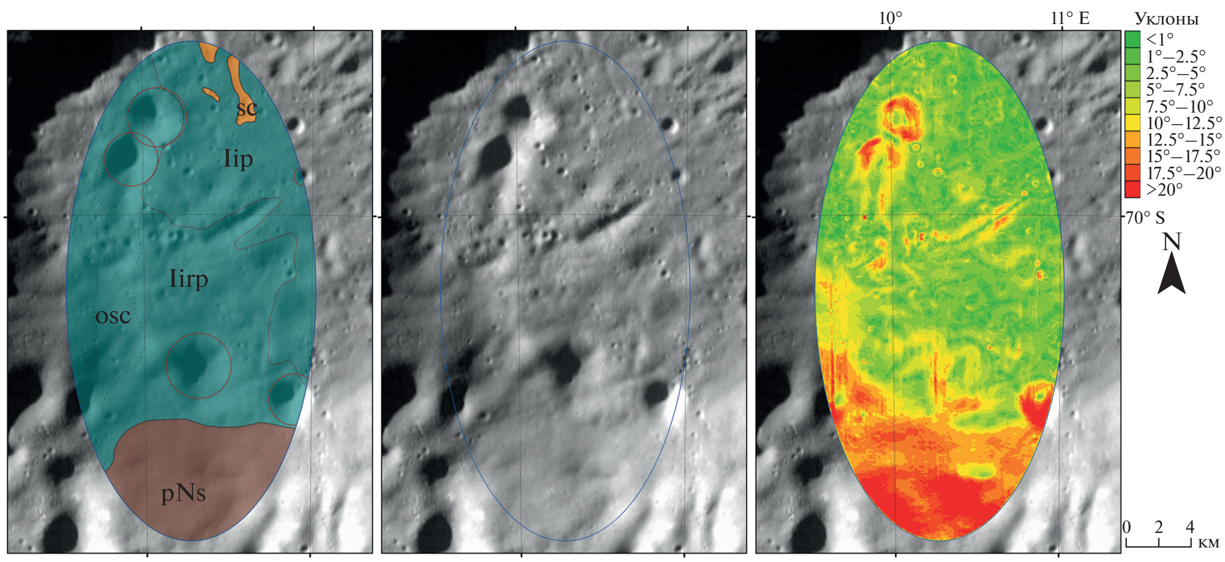

Рис. 11. Эллипс посадки 10.

щади эллипса. На юге эллипса располагается холмисто-западинная равнина rp (Nirp) 6.9% площади эллипса нектарианского возраста, относящаяся к выбросам кратера Simpelius G. Немного севернее этот кратер образовал вытянутые понижения и цепочку вторичных кратеров sc (Nsc) 6.5% площади эллипса. В эллипсе 5 присутствует несколько кратеров среднего размера, отнесенные к имбрийскому и эратосфенскому возрасту. Их геоморфологические подразделения представляют собой саму кратерную чашу и кратерированную равнину выбросов вокруг них, pc. Подразделения имбрийского возраста занимают 2.3% (Ic) и 11.2% (Iipc) площади эллипса, а части кратера эратосфенского возраста на западе эллипса занимают 0.3% (Ec) и 4% (Eipc) площади эллипса. Доля цепочек вторичных кратеров для данного эллипса sc составляет 4.5%; цепочки ориентированы преимущественно в направлении север-юг.

Эллипс 7 (72.16° ю.ш., 50.09° в.д.) расположен между кратерами Boguslawsky и Boussingault (рис. 8). Основную часть поверхности (61.3%) занимает подразделение sh (Iish) с перепадом высот до ~500 м. Данное подразделение образовано выбросами сравнительно молодого (имбрийского возраста) кратера Boguslawsky D (72.86° ю.ш., 47.41° в.д., диаметром 22 км), модельная мощность выбросов в пределах кратера достигает нескольких десят-

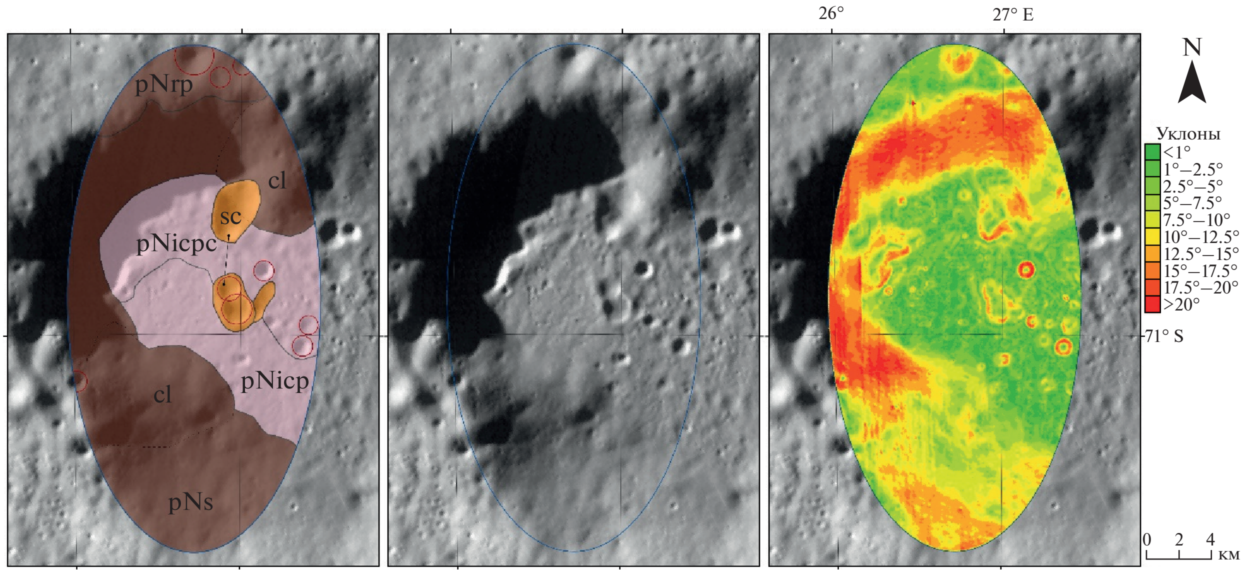

Рис. 12. Эллипс посадки 11.

ков метров. Кратер, расположенный на юго-востоке эллипса, также имеет имбрийский (I) возраст, его внешняя часть вала (Iis) занимает 4.8% площади территории эллипса, диаметр кратера 8 км. На севере эллипса расположен внутренний склон s кратера Boussingault (70.21° ю.ш., 53.73° в.д., с диаметром 128 км) донектарианского возраста (pNs) северо-восточной экспозиции. Склон имеет перепад высот ~1900 м со средним уклоном около 18°. Внутри кратера Boussingault располагается более молодой кратер Boussingault A (69.96° ю.ш., 53.87° в.д., диаметр 75 км) нектарианского возраста. Выбросы из него перекрыли днище и склоны кратера Boussingault, однако можно предположить, что материал этих выбросов нектарианского возраста частично переместился вниз по крутому склону кратера Boussingault, обнажая склон Boussingault донектарианского возраста. Таким образом, на северо-востоке эллипса образовались холмы h, сложенные выбросами кратера Boussingault A (Nih), занимающие 8.4% площади эллипса, предполагаемая мощность отложений составляет более ста метров. В выбросах этого кратера, возможно найти материал более древний, чем выбросы SPA.

Эллипс 8 (73.882° ю.ш., 26.363° в.д.) располагается на равнине с небольшим наклоном на север (рис. 9). Разница высот между северной и южной частью эллипса составляет ~250 м, что соответствует общему наклону поверхности в пределах эллипса ~0.8°. Поверхность внутри эллипса перекрыта выбросом материала из кратера Schomberger (I) с мощностью от ~100 м в южной части эллипса, до ~40 в северной. Основная часть эллипса (70.7%) расположена на слабонаклонной холмистой поверхности sh (Iish) со средней плотностью кратеров. Выбросы кратера Schomberger, перекрывающие большую часть эллипса, с большой долей вероятности могут содержать материал, выброшенный из-под покрова SPA. На северо-западе эллипса располагается слабонаклонный внешний борт кратера Schomberger D (pN – N, 73.38° ю.ш., 24.22° в.д., с диаметром 24 км), перекрытый имбрийскими отложениями s (Iis). Выбросы данного кратера расположены под покровом имбрийских отложений и имеют модельную мощностью около 100 м в северо-западной части эллипса, уменьшаясь до ~10 м в юго-восточной. На северо-востоке эллипса расположен кратер Schomberger Z эратосфенского возраста (73.59° ю.ш., 27.29° в.д., диаметр 6 км) с четко выраженной чашей кратера (Ec, 2.9% площади эллипса) и выбросами, представляющими слабонаклонную холмистую поверхность sh (Eish, 15% площади эллипса). Мощность выбросов составляет несколько десятков метров. Внутренний борт кратера обладает высокими значениями уклонов >20° на базе 60 м. Вокруг кратера можно обнаружить вытянутые понижения, образованные вторичными кратерами sc (Esc, 0.5% площади эллипса). Также в пределах эллипса есть цепочки и ложбины вторичных кратеров, перекрытые выбросами имбрийского возраста osc, 4% площади эллипса.

Эллипс 9 (71.718° ю.ш., 8.186° в.д.) располагается на дне кратера Simpelius D (pN) на границе выбросов имбрийского возраста из кратера Moretus (70.64° ю.ш., 354.05° в.д., диаметром 115 км). Модельная мощность этих выбросов составляет около 50 м (рис. 10). Выбросы из этого кратера образуют различные типы поверхностей, среди которых можно выделить ровную слабоволнистую поверхность p (Iip, 31.7% площади эллипса), кратерированную слабоволнистую поверхность pc (Iipc, 21.8% площади эллипса), холмисто-западинную поверхность rp (Iirp, 20.5% площади эллипс) с многочисленными малыми (сотни метров в диаметре) кратерами. Внутренний склон кратера Simpelius D (диаметр 56 км) частично перекрыт имбрийскими отложениями s (Iis, 6.3% площади эллипса). На западной границе эллипса располагается кратер имбрийского возраста диаметром 2.5 км c (Ic, 1.9% поверхности эллипса), окруженный выбросами rp. На севере эллипса располагается холмистая поверхность h (Iih, 15.7% поверхности эллипса). В северной части эллипса также видны вытянутые понижения, образованные вторичными кратерами sc. Кратер Moretus может являться источником древнего донектарианского материала, выброшенного из-под покрова SPA.

Эллипс 10 (70.148° ю.ш., 10.288° в.д.) расположен в 26 км на север от предыдущего эллипса, на днище соседнего кратера Simpelius E (диаметром 43 км) мощностью около 30 м (рис. 11). В этом эллипсе также преобладает равнинный материал имбрийского возраста, p (Iip, 25.7% площади эллипса) и rp (Iirp, 56.4% площади эллипса), выброшенного из кратера Moretus. Внутренний склон кратера Simpelius E (pN), расположенный на юге исследуемого эллипса обладает значительными уклонами и, вероятнее всего, не перекрыт выбросами имбрийского возраста s (pNs, 16.7% площади эллипса). На севере региона расположен небольшой кластер вторичных кратеров sc 1.2% площади эллипса. На востоке эллипса можно выделить вытянутое понижение, osc, перекрытое выбросами имбрийского возраста. Как и в предыдущем эллипсе, материал кратера Moretus является возможным источником древнего донектарианского материала.

Эллипс 11 (70.930° ю.ш., 26.715° в.д.) расположен на дне наиболее древнего кратера Boguslawsky C (диаметром 35 км) донектарианского (pN) возраста (рис. 12). Днище кратера занято ровной слабоволнистой поверхностью p (pNicp, 14.5% площади эллипса) и сильно кратерированной слабоволнистой поверхностью pc (pNicpc, 18.4% площади эллипса). На севере и юго-востоке располагается крутой внутренний склон s (pNs, 33% площади эллипса) кратера Boguslawsky C, имеющий общий уклон более 15°. Общий перепад высот внутренних склонов кратера достигает ~1200 м. На севере эллипса, за пределами кратера располагается холмисто-западинная равнина rp (pNrp, 7.3% площади эллипса). На внутреннем склоне можно выделить несколько оползней (cl 22.7% площади эллипса) большого объема. В границах кратера располагаются несколько серий вторичных кратеров, sc (4.1% площади эллипса). Кратер Boguslawsky C является вероятным источником древнего донектарианского материала, более древнего, чем покров SPA.

Общий характер поверхности исследуемых эллипсов подвержен сильному влиянию вторичного кратерообразования. В некоторых эллипсах выделяются кластеры малых (до 1 км) вторичных кратеров и вытянутые желоба – следы касательного удара выброшенного материала. По результатам изучения рельефа и геологического строения, исследуемые эллипсы можно разделить на наиболее и наименее приоритетные с научной точки зрения. Научная значимость эллипсов в данном случае определяется не столько модельными содержаниями льда, сколько другими характеристиками, например, разнообразием источников материала, накопившегося в потенциальных местах опробования. Также значимую роль имеют эллипсы, в пределах которых возможно найти древний, донектарианский материал, выброшенный из-под покрова SPA. Эллипсы 2 и 3 расположены в кратере Manzinus, глубина экскавации которого позволила выбросить материал, находившийся под покровом SPA. Эллипс 5 по большей части состоит из подразделений донектарианского возраста с различной морфологией поверхности, также в нем можно встретить подразделения нектарианского, имбрийского и эратосфенского возраста, кластеры вторичных кратеров. На востоке эллипса располагаются отложения кратера Boguslawsky C, которые могут являться источников материала, выброшенного из-под покрова SPA. Эллипс 7 интересен с геологической точки зрения тем, что межкратерная равнина, перекрытая выбросами имбрийского возраста, с севера прерывается внутренним склоном донектарианского кратера Boussingault, днище которого перекрыто выбросы нектарианского возраста. Основная часть эллипса 8 расположена на равнине имбрийского возраста, сформированной выбросами кратера Schomberger, потенциального источника материала, расположенного под покровом SPA. Эллипсы 9 и 10 практически полностью перекрыты выбросами имбрийского возраста из кратера Moretus. Кратер является потенциальным источником древнего донектарианского материала, расположенного под выбросами SPA. В эллипсе 9 интерес представляет разнообразная морфология поверхности, включающая классы рельефа p, pc, rp, h, c и s. Фотогеологический анализ снимков, сделанных в этом месте посадки, мог бы быть крайне важным для расшифровки геологической истории в южной полярной области. Эллипс 11 располагается в кратере Boguslawsky C донектарианского возраста. Эллипс Б1, как и Б2 расположены в одном кратере, в нескольких десятках километров друг от друга, однако в первом из них можно наблюдать более разнообразное морфологическое строение территории, которая частично перекрывается выбросом из имбрийского кратера.

ВЫВОДЫ

В работе были проанализированы запасные и некоторые параметры основных мест посадки аппарата Луна-Глоб (Луна-25). Рассматриваются инженерно-технические требования к условиям мягкой посадки и длительной работы в условиях полюса Луны, а также научная составляющая миссии.

Для безопасного прилунения в месте посадки требуется оценка рельефа на траектории подлета к эллипсу, оценка уклонов на поверхности и вероятность встречи камней в месте посадки. Окончательную потенциальную опасность рельефа на траектории снижения аппарата стоит оценивать при конечном расчете орбиты, поэтому стоит помнить, что эллипсы 2, 3, 9, 10, Б1 и Б2 находятся на дне кратера. Для исключения вероятности опрокидывания аппарата, уклон на поверхности не должен превышать 10° на базе ~3 м. К эллипсам с наиболее пологим рельефом стоит отнести основные 1, 4 и 6, а также запасные эллипсы посадки 2, 3 и 5. Измерение уклонов поверхности запасных эллипсов проводилось на базе 60 м/пикс. В ближайшем будущем необходимо оценить распространенности в эллипсах уклонов на базе опор спускаемого аппарата (3.5 м). Из табл. 1 видно, что распространенности уклонов на базе 60 м и 3.5 м не коррелируют друг с другом и оценка распространенности уклонов на базе 3.5 м может привести к изменению приоритетов рассматриваемых эллипсов. Для рассматриваемых эллипсов характерна низкая каменистость. Наблюдается незначительное увеличение камней в нескольких сравнительно свежих кратерах и выбросах из них в эллипсах 2, 3 и Б2, однако, площадь этих кратеров от всего эллипса незначительна и может не приниматься во внимание.

Наибольшая средняя концентрация WEH характерна для эллипсов 7 и 10 со значениями 0.19 ± 0.02 (1σ) и 0.14 ± 0.01 (1σ) мас. % соответственно. Основываясь на комплексном геолого-геоморфологическом анализе с учетом инженерно-технических требований и научной значимости, были выделены наиболее предпочтительные эллипсы для посадки (1, 3, 4, 6 и 8). К наименее пригодным для посадки эллипсам относится эллипс 5, 7, 9, 10, 11, а также Б1 и Б2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдрахимов А.М., Базилевский А.Т., Иванов М.А., Коханов А.А., Карачевцева И.П., Хэд Дж. У. Оценка вероятностей встречи уклонов на поверхности Луны по доле затененной поверхности на снимках LROC NAC // Астрон. вестн. 2015. Т. 49. № 5. С. 1–9. (*Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Ivanov M.A., Kokhanov A.A., Karachevtseva I.P., Head J. W.* Occurrence Probability of Slopes on the Lunar Surface: Estimate by the Shaded Area Percentage in the LROC NAC Images // Sol. Syst. Res. 2015. V. 49. № 5. P. 285–294.) https://doi.org/10.7868/S0320930X15050011

Демидов Н.Э., Базилевский А.Т. Отношения высоты лунных камней к их поперечнику по результатам анализа панорам Лунохода-1, -2, Apollo-11–17 и снимков камеры LROC NAC // Астрон. вестн. 2014. Т. 48. № 5. С. 351–357. (*Demidov N.E., Basilevsky A.T.* Height-to-Diameter Ratios of Moon Rocks from Analysis of Lunokhod-1 and -2 and Apollo 11–17 Panoramas and LROC NAC Images // Sol. Syst. Res. 2014. V. 48. № 5. P. 324–329.) https://doi.org/10.1134/S0038094614050013

Дьячкова М.В., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Санин А.Б. Выбор мест посадки космического аппарата Луна-25 в окрестности южного полюса Луны // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 3. С. 204–215. (*Djachkova M.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B.* Selection of Luna-25 Landing Sites in the South Polar Region of the Moon // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 3. P. 185–195.) https://doi.org/10.1134/S0038094617030029

Иванов М.А., Базилевский А.Т., Бричева С.С., Гусева Е.Н., Демидов Н.Э., Захарова М., Красильников С.С. Фундаментальные проблемы изучения Луны, технические средства подходов к их решению и потенциальные регионы исследования. Астрон. вестн. 2017. Т. 51. С. 473–489. (*Ivanov M.A., Basilevsky A.T., Bricheva S.S., Guseva E.N., Demidov N.E., Zakharova M., Krasil'nikov S.S.* Fundamental Problems of Lunar Research, Technical Solutions, and Priority Lunar Regions for Research // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 6. P. 441–456.) https://doi.org/10.1134/S0038094617060041

Красильников С.С., Базилевский А.Т., Иванов М.А., Абдрахимов А.М., Коханов А.А. Оценка крутизны склонов в местах посадки КА Луна-Глоб по доле тени на снимках LROC NAC // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 2. С. 99–109. (*Krasilnikov S.S., Basilevsky A.T., Ivanov M.A., Abdrakhimov A.M., Kokhanov A.A.* Steepness of Slopes at the Luna-Glob Landing Sites: Estimating by the Shaded Area Percentage in the LROC NAC Images // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 2. P. 87–97.) https://doi.org/10.1134/S0038094618010045

Bandfield J.L., Ghent R.R., Vasavada A.R., Paige D.A., Lawrence S.J., Robinson M.S. Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner Radiometer data // J. Geophys. Res. E: Plan. 2011. V. 116. P. 1–18. https://doi.org/10.1029/2011JE003866

Feldman W.C., Maurice S., Lawrence D.J., Little R.C., Lawson S.L., Gasnault O., Wiens R.C., Barraclough B.L., Elphic R.C., Prettyman T.H., Steinberg J.T., Binder A.B. Evidence for water ice near the Lunar poles // J. Geophys. Res. E: Plan. 2001. V. 106. P. 23231–23251. https://doi.org/10.1029/2000JE001444

Housen K.R., Schmidt R.M., Holsapple K.A. Crater ejecta scaling laws: fundamental forms based on dimensional analysis // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P. 2485–2499. https://doi.org/10.1029/JB088iB03p02485

Ivanov M.A., Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Demidov N.E., Djachkova M.V., Guseva E.N., Head J.W., Hiesinger H., Kohanov A.A., Krasilnikov S.S., Mitrofanov I.G. Geological characterization of the three high-priority landing sites for the Luna-Glob mission // Planet. and Space Sci. 2018 V. 162. P. 190–206.

Ivanov M.A., Hiesinger H., Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Head J. W., Pasckert J.H., Bauch K., van der Bogert C.H., Gläser P., Kohanov A. Landing site selection for Luna-Glob mission in crater Boguslawsky // Planet. and Space Sci. 2015. V. 117. P. 45–63. https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.05.007

Li S., Lucey P.G., Milliken R.E., Hayne P.O., Fisher E., Williams J.-P., Hurley D.M., Elphic R.C. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions // PNAS. 2018. V. 115. P. 8907–8912. https://doi.org/10.1073/pnas.1802345115

Melosh H.J. Impact cratering: A geologic process. N.-Y.: Oxford Univ. Press, 1989. 253 p.

Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Malakhov A., Mazarico E., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M., Nandikotkur G., Neumann G.A., Nuzhdin I., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Smith D.E., Starr R., Tretyakov V.I., Trombka J., Usikov D., Varenikov A., Vostrukhin A., Zuber M.T. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND // Science. 2010. V. 330. Is. 6003. p. 483–486. https://doi.org/10.1126/science.1185696

Paige D.A., Foote M.C., Greenhagen B.T., Schofield J.T., Calcutt S., Vasavada A.R., Preston D.J., Taylor F.W., Allen C.C., Snook K.J., Jakosky B.M., Murray B.C., Soderblom L.A., Jau B., Loring S., Bulharowski J., Bowles N.E., Thomas I.R., Sullivan M.T., Avis C., De Jong E.M., Hartford W., McCleese D.J. The lunar reconnaissance orbiter diviner lunar radiometer experiment // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. P. 125–160. https://doi.org/10.1007/s11214-009-9529-2

Robinson M.S., Brylow S.M., Tschimmel, Humm M.D., Lawrence S.J., Thomas P.C., Denevi B.W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M.A., Caplinger M.A., Ghaemi F.T., Schaffner J.A., Malin M.C., Mahanti P., Bartels A., Anderson J., Tran T.N., Eliason E.M., McEwen A.S., Turtle E., Jolliff B.L., Hiesinger H. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. Iss. 1–4. P. 81–124.

Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Bakhtin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., Harshman K., Fedosov F., Golovin D. V., Kozyrev A.S., Livengood T.A., Malakhov A.V., McClanahan T.P., Mokrousov M.I., Starr R.D., Sagdeev R.Z., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A.A. Hydrogen distribution in the lunar polar regions // Icarus. 2017. V. 283. P. 20–30. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.002

Sharpton V.L. Outcrops on lunar crater rims: Implications for rim construction mechanisms, ejecta volumes and excavation depths // J. Geophys. Res. E: Plan. 2014. V. 119. P. 154–168. https://doi.org/10.1002/2013JE004523

Smith D.E., Zuber M.T., Jackson G.B., Cavanaugh J.F., Neumann G.A., Riris H., Sun X., Zellar R.S., Coltharp C., Connelly J.,KatzIgor R.B., Kleyner P., Liiva P., Matuszeski A., Mazarico E.M., McGarry J.F., Novo-Gradac A-M., Ott M.N., Peters C., Ramos-Izquierdo L.A., Ramsey L., Rowlands D.D., Schmidt S., Stanley Scott III V., Shaw G.B., Smith J.C., Swinski J.P., Torrence M.H., Unger G., Yu A.W., Zagwodzki T.W. The Lunar Orbiter Laser Altimeter Investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission // Space Sci. Rev. 2010. 150: 209–241 https://doi.org/10.1007/s11214-009-9512-y

Wilhelms D.E., McCauley J.F. Geologic map of the near side of the Moon // US Geological Survey Map I-703. 1971.