

УДК 523.34

## ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ВЫБРОСОВ ИЗ УДАРНЫХ КРАТЕРОВ В ЮЖНОМ ПОЛЯРНОМ РЕГИОНЕ ЛУНЫ

© 2023 г. А. С. Красильников<sup>а</sup>\*, С. С. Красильников<sup>а</sup>, М. А. Иванов<sup>а</sup>, Дж. У. Хэд<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup>Department of Earth, Environmental & Planetary Sciences, Brown University, Providence, RI, USA

\*e-mail: krasilnikov\_as@geokhi.ru

Поступила в редакцию 12.04.2022 г.

После доработки 14.09.2022 г.

Принята к публикации 19.09.2022 г.

В работе представлены результаты модельных расчетов вариаций мощности выбросов ударных кратеров в южном полярном регионе Луны от южного полюса до 70° ю.ш. для кратеров нектарианского, имбрийского, эратосфенского и коперниковского возрастов. В работе не рассматриваются кратеры донектарианского возраста, так как границы их выбросов часто скрыты более молодыми отложениями. Для оценки мощности были выбраны модели Housen, Sharpton и Fassett. Первая применялась для кратеров крупнее 45 км в диаметре, вторая для кратеров меньшего размера (от 3 до 45 км), третья использовалась применительно к бассейну моря Восточного. При оценке мощности учитывался фактор смещения выбросов с подстилающим реголитом (фактор  $\mu$ ). В результате исследования были построены карты мощностей выбросов для южного полярного региона Луны. Они предоставляют возможность количественно оценить вклад ударных событий разного возраста в формировании полярного реголита и, соответственно, определять доминирующий источник (источники) вещества в той или иной области, в частности, в предполагаемых местах посадок спускаемых аппаратов.

**Ключевые слова:** Луна, южный полюс, мощность отложений, вторичные кратеры, выбросы, Луна-25

**DOI:** 10.31857/S0320930X23020044, **EDN:** NVUBEQ

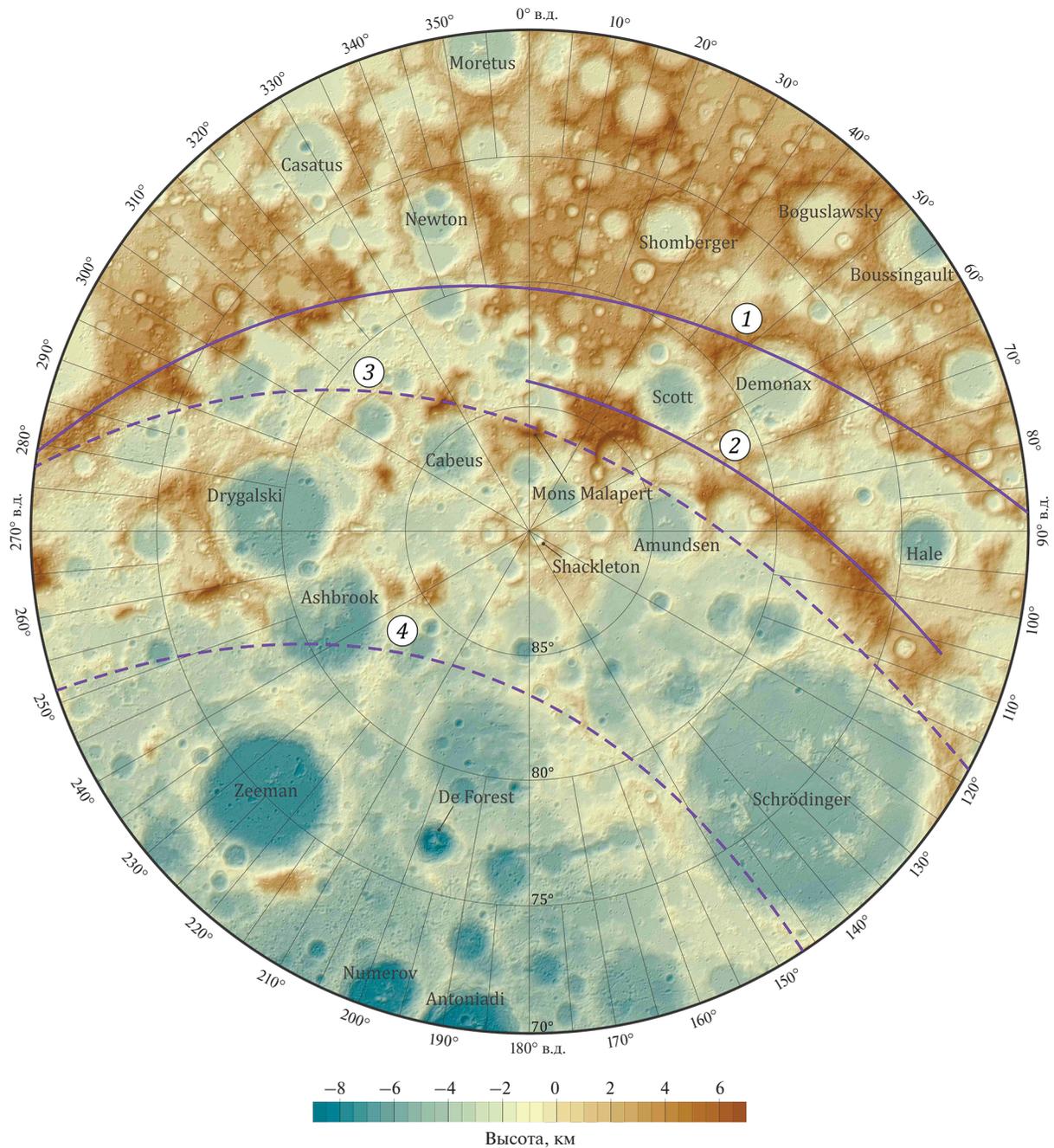
### ВВЕДЕНИЕ

Регион вокруг южного полюса Луны рассматривается корпорацией Роскосмос как главная цель Российской программы изучения и освоения Луны. Большой интерес к данному региону связан с существованием участков с повышенной концентрацией водорода в реголите (Feldman и др., 1998; 2000; 2001; Mitrofanov и др., 2010; 2012; Boynnton и др., 2012). Наиболее естественным объяснением водородных аномалий является их интерпретация как скоплений льда воды (Feldman и др., 1998).

Прямое свидетельство наличия водяного льда в полярном реголите Луны представил эксперимент LCROSS, в результате которого было определено содержание воды до 6 об. % (Colaprete и др., 2010). Скопления водяного льда часто связаны с вечно затененными областями в приполярных областях Луны. Однако в некоторых случаях, например, в кратере Кабео (место проведения эксперимента LCROSS), повышенные концентрации водорода распространяются и за пределы таких участков. По данным Sanin и др. (2017) концентрации водорода в пересчете на воду (WEN, Water

Equivalent Hydrogen) в реголите могут достигать 0.54 (вес. %) (кратер Кабео).

Помимо повышенных концентраций водорода, южный полярный регион представляет крайне важную с научной точки зрения область, так как охватывает южную часть крупнейшего (Wilhelms и др., 1979; 1987) и, вероятно, древнейшего (Hiesinger и др., 2012) из известных ударных бассейнов, Южный полюс – Эйткен (SPA, South Pole – Aitken). Размеры бассейна оцениваются как 2050 × 2400 км (Garrick-Bethell, Zuber, 2009), глубина более 8 км (Smith и др., 2010). Возраст соответствует 4.2 млрд лет (Hiesinger и др., 2012). Формирование бассейна оказало решающее влияние на облик поверхности южного полярного региона, который включает части днища, зоны валов и сплошных выбросов. Так как бассейн SPA это древнейший из известных, то в его выбросах должно присутствовать вещество древней лунной коры и, возможно, мантии (Yamamoto и др., 2010; Melosh и др., 2017). Однако некоторые авторы выражают сомнения относительно наличия мантийного вещества в выбросах бассейна (Lucey, 2004).



**Рис. 1.** Предполагаемые границы бассейна SPA: 1 – Эллипс SPA по (Wilhelms и др., 1979). 2 – Массивы SPA, хорошо коррелирующие с 3 – внешним эллипсом по (Garrick-Bethell, Zuber, 2009). 4 – Внутренний эллипс по (Garrick-Bethell, Zuber, 2009).

В результате продолжающейся метеоритной бомбардировки после формирования бассейна SPA образовалось множество ударных структур. Некоторые из них достигают многих десятков километров в диаметре (рис. 1). Эти ударные кратеры в значительной степени переработали и перераспределили материал, как днища, так и в зоне выбросов бассейна SPA. Наиболее крупные из этих кратеров были способны пробить отложения

выбросов бассейна и выбросить на поверхность подстилающий материал. В выбросах таких кратеров, следовательно, можно обнаружить вещество, предшествовавшее ударному событию SPA и представляющее исключительную научную ценность.

В статье приводятся результаты изучения одного из аспектов перераспределения вещества в

ударном процессе, а именно отложение сплошных выбросов с помощью модельных оценок их мощности для ударных структур, сформированных после события SPA. Такие расчеты позволяют установить предполагаемые источники вещества, накопившегося в том или ином месте южного полярного региона. В свою очередь, знание об источнике вещества крайне важно при выборе мест посадок спускаемых аппаратов и при интерпретации результатов анализов собранного материала.

В данной статье представлены результаты модельных оценок мощности выбросов для кратеров нектарианского, имбрийского, эратосфеновского и коперниковского возраста, которые расположены в области от 90° до 70° ю.ш. Оценки основаны на новой геологической карте южной полярной области Луны, составленной в масштабе 1 : 300 000 (Krasilnikov и др., 2021).

#### МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ВЫБРОСОВ КРАТЕРОВ

Основой анализа послужила геологическая карта южного полярного региона, которая показывает распространение морфологически однородных подразделений (в подавляющем большинстве это ударные кратеры и их выбросы) в пространстве и времени. Карта позволяет оценивать мощность выбросов разновозрастных кратеров и таким образом реконструировать трехмерную стратиграфию изучаемой территории.

Геологическая карта (Krasilnikov и др., 2021) была составлена в результате тщательного фотогеологического анализа поверхности на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР), построенных по данным лазерного высотомера LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) (Smith и др., 2010) с пространственным разрешением до 20–60 м/пикс и мозаики снимков широкоугольной камеры WAC (Wide Angle Camera) с разрешением до 100 м/пикс; оба инструмента установлены на КА LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter). Относительный возраст подразделений, отмеченных на карте, определяется по принципу суперпозиции (Wilhelms, 1974; Wilhelms и др., 1987), а абсолютный модельный — по частотно-размерному распределению (ЧРР) первичных кратеров (Neukum, 1977; Werner, 2005; Hiesinger и др., 2010). Определения ЧРР проводились либо на днище крупных кратеров, либо в зоне сплошных выбросов, когда измерения на дне были невозможны.

На сегодняшний день разработаны следующие пять основных моделей для оценки мощности выбросов кратеров, представленных в работах

(McGetchin и др., 1973; Pike, 1974; Housen и др., 1983; Fassett и др., 2011; Sharpton, 2014).

Модель McGetchin и др. (1973) была основана на данных, относящихся к малым ударным кратерам и кратерам, образовавшимся во время ядерных испытаний, и экстраполированных на ударные структуры большего диаметра. McGetchin и др. (1973) предложили следующую формулу для изменений мощности выбросов ( $T$ ) в зависимости от расстояния от кратера:

$$T = 0.14 \times R^{0.74} \left(\frac{r}{R}\right)^{-3}. \quad (1)$$

Здесь и далее  $R$  — радиус кратера,  $r$  — расстояние от центра кратера; все значения в метрах. В своей статье Pike (1974) подверг критике подход McGetchin и др. (1973), так как, по его мнению, брались неверные данные по морфологии изучаемых кратеров, а рассчитанная мощность неудовлетворительно коррелировала с известными на Земле ударными структурами. В своей работе Pike (1974) предложил альтернативную формулу:

$$T = 0.033 \times R \left(\frac{r}{R}\right)^{-3}. \quad (2)$$

Модель Housen и др. (1983) была разработана на основе теоретического моделирования ударного события, вызванного ударником с определенной скоростью, диаметром и плотностью. Их итоговая формула:

$$T = 0.0078 \times R \left(\frac{r}{R}\right)^{-2.61}. \quad (3)$$

Данная модель построена с использованием размерного анализа и теории связи энергии и импульса при образовании кратеров. Авторам работы (Housen и др., 1983) удалось вывести общие соотношения, которые позволили сопоставить результаты моделирования с реально существующими кратерами Луны. Однако, по их мнению, необходимыми дополнениями к модели является оценка изменения скорости выбросов для кратеров разного размера и степенных зависимостей скорости выброса, применительно к зонам близ центра и бортов кратеров.

Fassett и др. (2011) разработали модель, которая описывает изменения мощности выбросов для бассейна Моря Восточного. Они провели оценку изменения мощности выбросов по мере удаления от внешнего вала бассейна (Кордильеры), используя в качестве маркеров ударные кратеры, частично заполненные выбросами. Новые топографические данные, полученные с LOLA (Smith и др., 2010), позволили оценить степень заполнения и, соответственно, мощность выбросов. В результате была выведена формула:

$$T = 2900(\pm 300) \left(\frac{r}{R}\right)^{-2.8(\pm 0.5)}, \quad (4)$$

где  $R$  – постоянная величина (465 км), равная радиусу вала Кордильер.

Наконец, в своей работе Sharpton (2014) использовал новые топографические данные для описания топологии относительно небольших кратеров (диаметром 2–45 км). В своей работе он раскритиковал модель McGetchin и др. (1973), так как в ней учитывались наблюдаемые диаметры кратеров, а не переходной полости, а изменения отношения глубина/диаметр по мере увеличения размера кратеров (Pike, 1974) не учитывались. Формула, предложенная в работе Sharpton (2014) имеет следующий вид:

$$T = 3.95(\pm 1.19) R^{0.399} \left(\frac{r}{R}\right)^{-3}. \quad (5)$$

### ПРОЦЕСС ОТЛОЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ, ФАКТОР СМЕШЕНИЯ

Описанные модели дают представление о мощности отложений выбросов, однако не учитывают неизбежное смешение материала выбросов с подстилающим реголитом. При образовании покрова выбросов происходит выпадение разноразмерного материала, образующего вторичные ударные кратеры разного диаметра. За счет этого реголит приповерхностных слоев перемешивается с падающим материалом выбросов. Решение проблемы смешивания было предложено в работе (Oberbeck и др., 1975), где было проведено комплексное исследование по определению отношения местного и привнесенного материала, фактор смешения  $\mu$ . Oberbeck и др. (1975) провели ряд экспериментов по соударению под углами  $60^\circ$  и  $75^\circ$  кварцевых ударников с мишенью, сложенной из кварцевым песком. По полученным в ходе экспериментов данным, а также по результатам изучения вторичных кратеров Коперника на Луне, им удалось выявить закономерность изменения значения  $\mu$  по мере удаления от кратера:

$$\mu = 0.0183 \times R^{0.87}, \quad (6)$$

где  $R$  – расстояние от середины радиуса кратера до места расчета его выбросов. Oberbeck и др. (1975) привели аргументы, что данная зависимость может применяться не только для определения степени смешения выбросов кратера Коперник, но и для других крупных лунных кратеров. Значение  $R$  было выбрано равным расстоянию от середины радиуса кратера до места расчета по той причине, что не представляется возможным определить, из какой части кратера вылетел фраг-

мент, который впоследствии образовал вторичный кратер.

Однако некоторые авторы (Schulz, Gault, 1985; Petro, Pieters, 2006) считают, что в своих расчетах Oberbeck завывсил величину  $\mu$ . В отличие от Oberbeck и др. (1975), Schulz и Gault (1985) производили серию опытов, выстреливая в мишень из кварцевого песка, как одиночными ударниками, так и их кластерами. Для моделирования одиночных ударов на низких скоростях соударения использовались ударники из алюминиевой и стальной дроби, железных опилок и песка. Для моделирования кластерных соударений на средних и высоких скоростях использовались сферы из пирекса, которые разрушались при прохождении через экран из алюминиевой фольги или бумаги, расположенного над мишенью. Сами мишени были представлены песком и уплотненной пемзой. В результате экспериментов было установлено, что морфология вторичных кратеров лучше совпадает с формами, полученными в экспериментах с кластерными ударниками, которые, в отличие от одиночных, характеризуются меньшей глубиной экскавации. Это значительно увеличивает отношение местного материала к привнесенному и, соответственно, уменьшает величину фактора смешения.

Petro и Pieters (2006) в своей работе по моделированию состава реголита в месте посадки КА Apollo-16 указывали, что, по их мнению, значение  $\mu$  должно быть уменьшено в два раза относительно формулы Oberbeck и др. (1975). В своей работе Petro и Pieters (2006) сравнивали результаты различных моделей образования отложений выбросов, в том числе модели со смешением материала и без него. Для определения мощности выбросов, авторы использовали модели Pike (1974) и Housen и др. (1983) и установили, что результаты, полученные при использовании модели смешения Oberbeck и др. (1975), плохо сопоставимы с геохимическими и петрографическими особенностями грунта, полученного Apollo-16 (Korotev, 1997). Такое несоответствие привело Petro и Pieters (2006) к заключению, что фактор смешения  $\mu$ , рассчитываемый по формуле (6), надо уменьшить в два раза.

### РЕЗУЛЬТАТЫ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ВЫБРОСОВ В РАЙОНЕ ВОКРУГ ЮЖНОГО ПОЛЮСА ЛУНЫ

В нашей работе при оценке мощности выбросов были использованы формулы (3), (4) и (5). Формула McGetchin и др. (1973), возможно, недооценивает мощность, а формула Pike (1974) – переоценивает.

Модель Housen и др. (1983), основана на результатах теоретического моделирования ударных событий, образующих кратеры в широком диапазоне диаметров. В данной работе эта модель использовалась применительно к более крупным кратерам. Формула, представленная в работе (Sharpton, 2014), основана на тщательном морфометрическом анализе малых кратеров и, как прямо указывает автор, применима для оценки мощности выбросов из кратеров диаметром 3–45 км. В нашей работе эта формула использовалась для кратеров в диапазоне диаметров от 20 до 45 км. Формула, предложенная в работе Fassett и др. (2011) основана на морфометрическом изучении выбросов из бассейна Моря Восточного и, вероятно, применима к крупным ударным структурам, таким как ударные бассейны (>300 км в диаметре). В нашем исследовании она была использована только для оценки мощности выбросов из бассейна Моря Восточного.

Новая геологическая карта южного полярного региона (Krasilnikov и др., 2021) позволяет упорядочить ударные кратеры по их стратиграфическому возрасту и таким образом оценивать мощность их выбросов, относящихся к разным эпохам геологической истории Луны. С помощью этой карты и с использованием указанных выше моделей была составлена карта мощностей выбросов из кратеров от нектарианского до коперниковского возраста (рис. 2а), и серия карт для каждого геологического периода по отдельности (рис. 3). Эти карты представляют первичные результаты расчетов, которые в дальнейшем были детализированы с учетом фактора смещения по моделям (Oberbeck и др., 1975, рис. 2б, (4)) и (Petro, Pieters, 2006, рис. 2в, (5)).

Оценки мощности выбросов в соответствии с моделями по формулам (3), (4) и (5) проводились инкрементально в пределах концентрических зон вокруг валов изучаемых кратеров. Ширина зон выбиралась пропорционально размеру того или иного кратера и возрастала с увеличением его диаметра. Для кратеров диаметром менее 25 км, величина инкремента составляла 2.5 км, для кратеров диаметром 26–80 км она была 5 км, для кратеров диаметром 81–130 км составляла 10 км, а для более крупных кратеров – 20 км. Расчет отложений выбросов бассейна Моря Восточного проводился с шагом 60 км. Такой подход существенно упрощает процесс вычислений, а итоговые карты приобретают лучшую читаемость.

В результате карта пространственного распределения мощности выбросов представляет серии кольцевых зон, цвет которых кодирует мощность. Внешние границы кольцевых серий вокруг того или иного кратера соответствуют границам под-

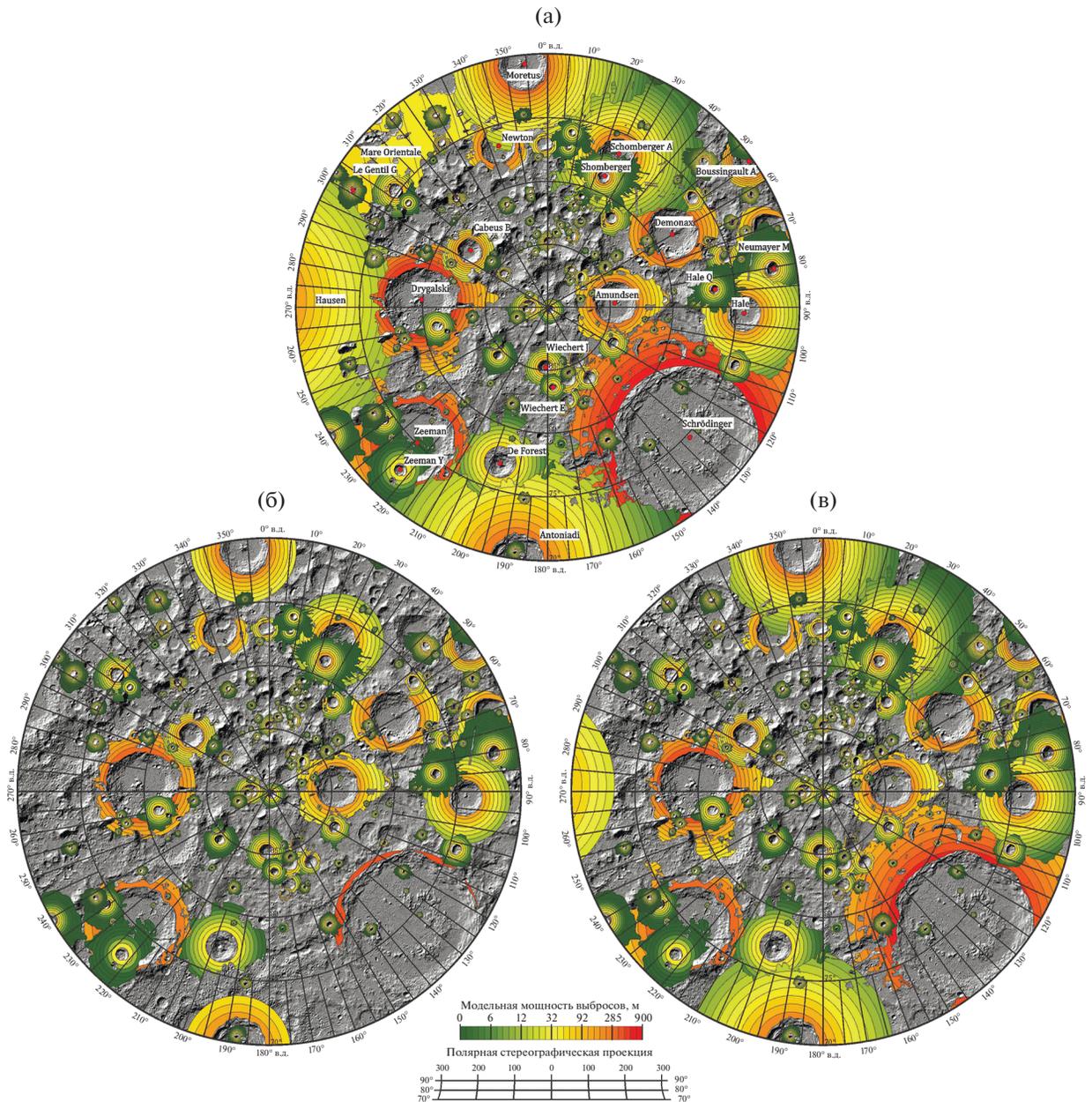
разделений, показанных на геологической карте (Krasilnikov и др., 2021). Построенная таким образом карта мощностей была модифицирована с учетом фактора смещения ( $\mu$ ), предложенного Oberbeck и др. (1975). Поскольку  $\mu$  является отношением местного материала к привнесенному, то все кольцевые зоны со значением  $\mu \geq 1$  убирались, так как в них преобладает местный реголит, а морфологические характеристики выбросов, на которых основана геологическая карта, стираются. В зонах со значением  $\mu < 1$  полученная в результате модельных расчетов мощность  $T$ , делилась на величину  $\mu + 1$ , с целью получить значение мощности покрова выбросов с поправкой на фактор смещения. Аналогично проводилось построение карт выбросов с учетом смещения материала по модели Petro и Pieters (2006).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Построенные карты мощности выбросов (рис. 2–5) позволяют идентифицировать источники материала и его долю в приповерхностном слое реголита. В свою очередь, размеры родительских кратеров позволяют приблизительно оценить глубину, с которой был выброшен материал, если принять, что глубина экскавации в общем случае равна одной десятой диаметра кратера (Melosh, 1989). Так, например, раннеимбрийский кратер Морет ( $d = 115.55$  км), расположенный в секторе  $335^\circ - 70^\circ$  в.д. и  $77^\circ - 70^\circ$  ю.ш., вероятно, пробил отложения выбросов из бассейна SPA и выбросил на поверхность еще более древний материал лунной коры.

С помощью карт мощности выбросов появляется возможность определить количество того или иного материала, представляющего выбросы из кратеров от нектарианского до коперниковского возраста. В нашей работе мы не рассматривали более древние, донектарианские кратеры, так как на геологической карте донектарианский материал представлен как нерасчлененная толща, на которой морфологические признаки индивидуальных ударных структур в основном стерты.

Карта, составленная с применением моделей (3)–(5), дает общую картину пространственного распределения разновозрастных выбросов, которая может быть уточнена с использованием моделей смещения. Однако эти модели сильно отличаются друг от друга (рис. 2). При их сравнении становится очевидным, что при использовании модели Oberbeck и др. (1975) морфологическая граница выбросов, где значения  $\mu < 1$ , заметно сужается и приближается к гребню вала кратера. В модели Petro и Pieters (2006) зоны морфологически выраженных выбросов становятся существенно шире.



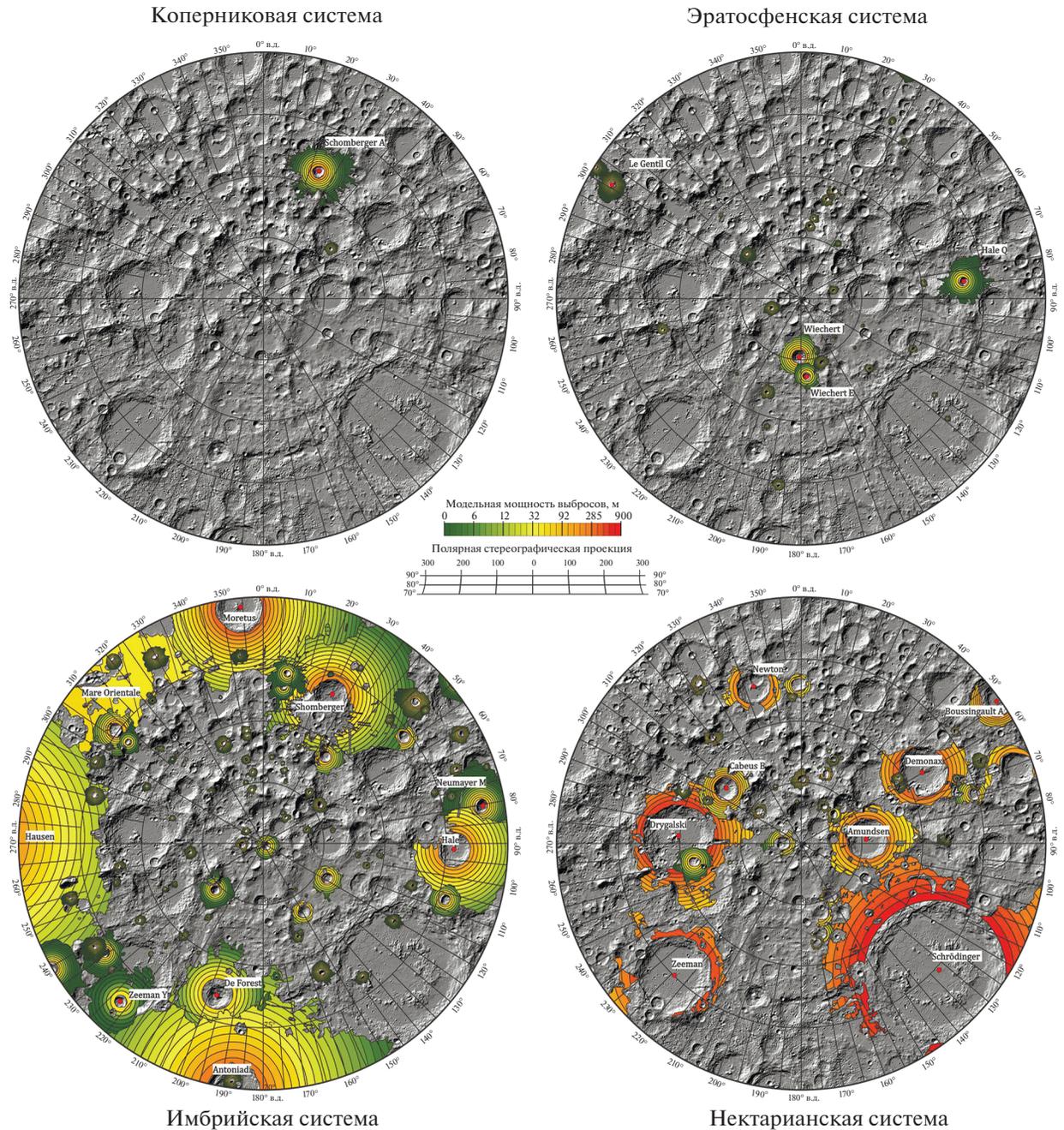
**Рис. 2.** Модельная мощность выбросов кратеров нектарианского—коперниковского возраста в районе южного полюса Луны: (а) — без учета смещения материала; (б) — с учетом смещения материала по Oberbeck и др. (1975); (в) — с учетом смещения материала по Petro и Pieters (2006).

В настоящее время мы изучаем соотношение величины фактора смещения и ширины зоны сплошных выбросов из кратеров разного диаметра и высокой морфологической сохранности и для того, чтобы ввести обоснованные ограничения на изменения величины  $\mu$ .

Полученные данные о модельном распределении мощности выбросов в южной приполярной области Луны важны для интерпретации резуль-

татов, которые могут быть получены при проведении экспериментов на планируемых спускаемых аппаратах, в том числе экспедиции Луна-25.

Эта экспедиция является одним из наиболее приоритетных проектов корпорации Роскосмос на данный момент. При интерпретации результатов, полученных в одном из выбранных мест посадки (эллипсы 1, 4 и 6, рис. 6), важно представлять геологическое строение региона и источни-

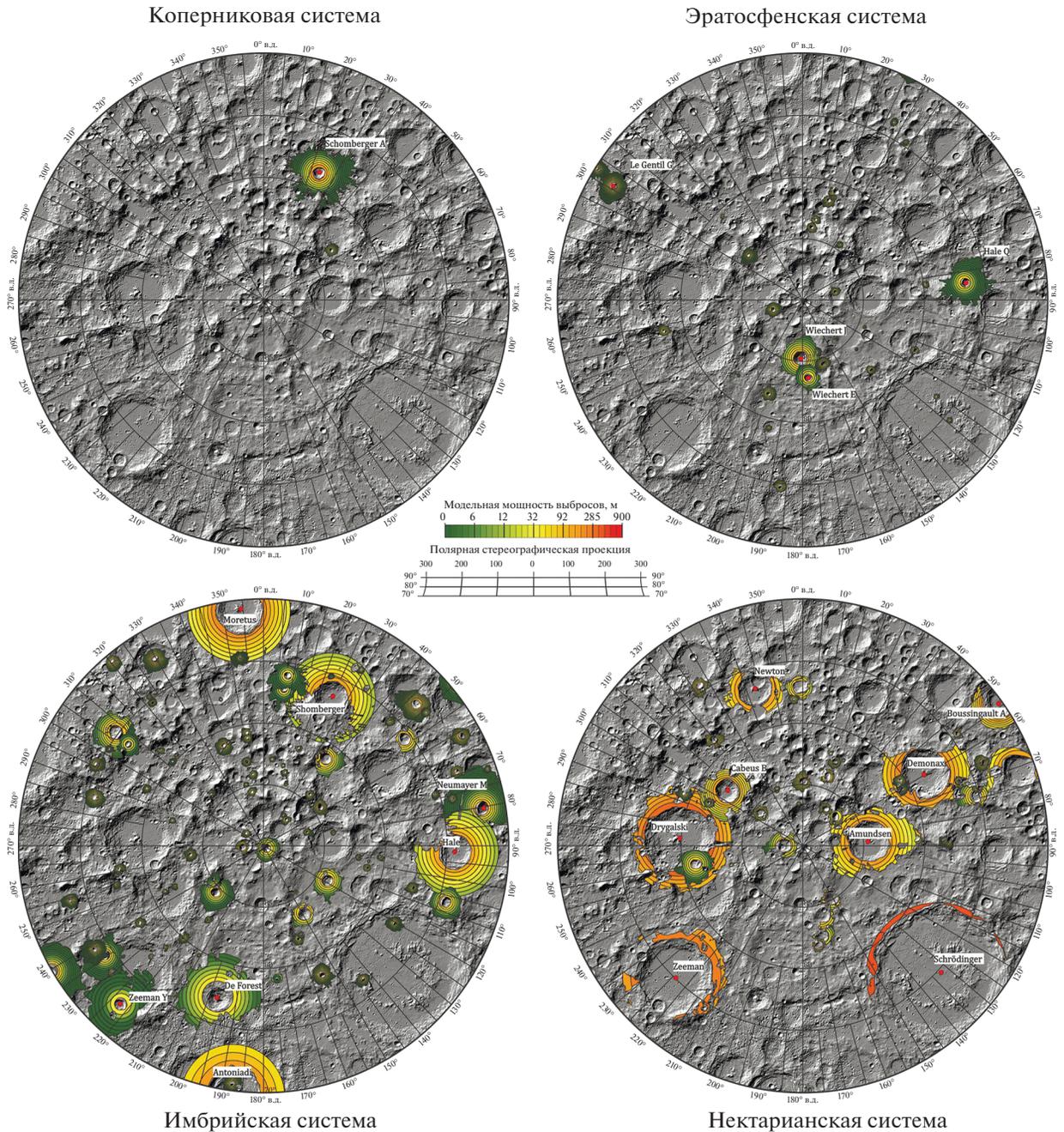


**Рис. 3.** Модельная мощность выбросов кратеров в районе южного полюса Луны коперниковского, эратосфенского, имбрийского и нектарианского возрастов без учета смещения материала.

ков материала, слагающего поверхность. Для этого нами была построена карта мощности выбросов в области от  $0^\circ$  до  $52^\circ$  в.д., и от  $65^\circ$  до  $75^\circ$  ю.ш., где расположены наиболее перспективные эллипсы посадки (рис. 6а). Карта составлена на основе геологической карты масштаба 1 : 300 000 (Красильников и др., 2022) с применением тех же методик, использованных при построении общей

карты южной приполярной области, в том числе, с учетом моделей фактора смещения по Oberbeck и др. (1975, рис. 6б) и Petro и Pieters (2006, рис. 6в).

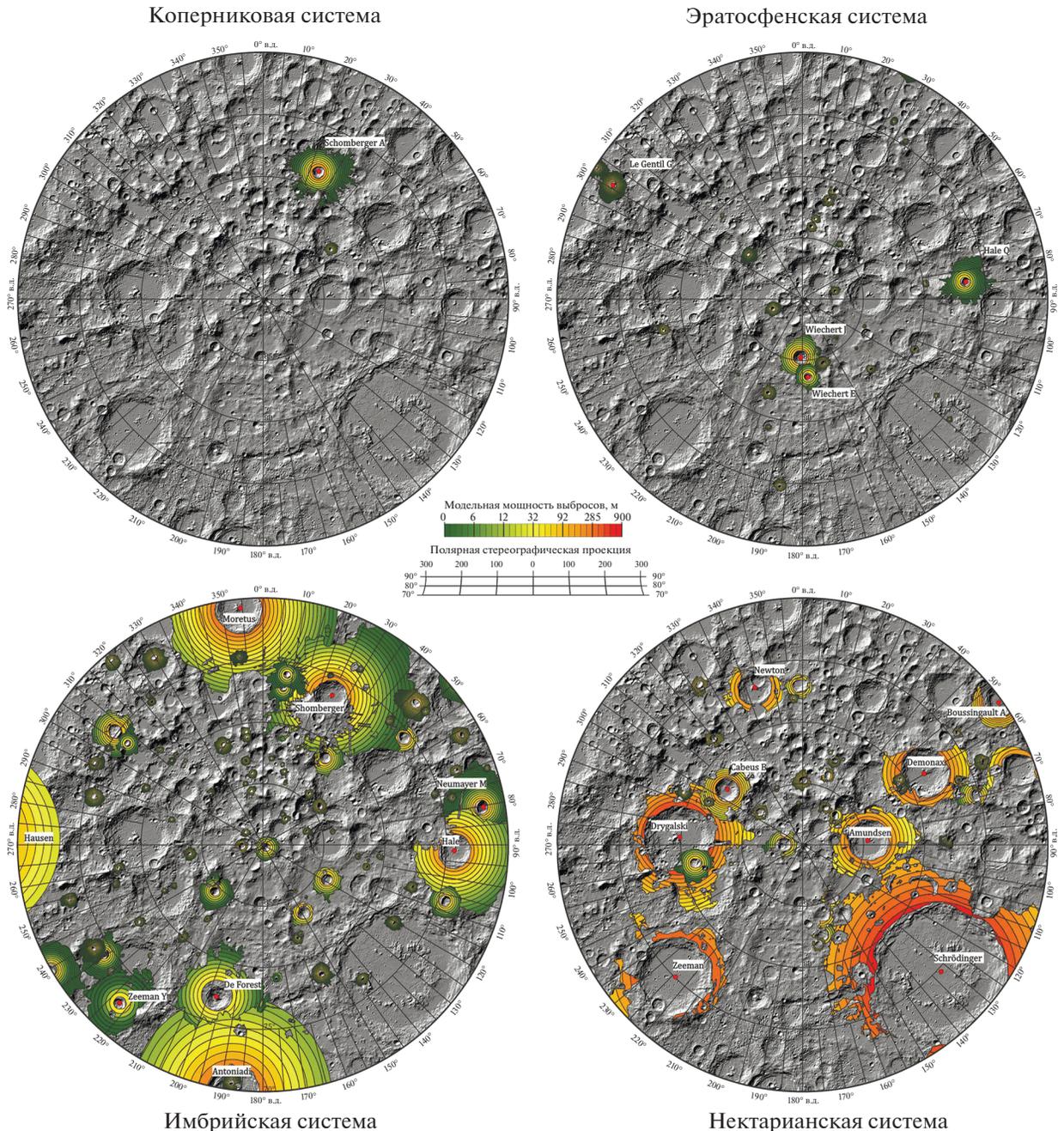
Карты позволяют количественно оценить количество материала из того или иного источника в месте посадки. Например, в эллипсах 1 и 4 (рис. 6) главным источником является кратер Морет. Мощность его выбросов (без учета фактора сме-



**Рис. 4.** Модельная мощность выбросов кратеров в районе южного полюса Луны коперниковского, эратосфенского, имбрийского и нектарианского возрастов с учетом фактора смещения по Oberbeck и др. (1975).

шения) составляет от 20.5–15.9 м в эллипсе 1 до 6.8–5.7 м в эллипсе 4. Выбросы этого кратера залегают на донектарианском основании. Малая модельная мощность имбрийских отложений кратера Морет в данных эллипсах посадки означает, что ударные кратеры малого размера могли бы выбросить более древний материал из-под покрова выбросов. Таким образом, в эллипсах посадки 1 и 4 реголит может представлять собой

смесь выбросов имбрийского возраста (кратер Морет) и подстилающих пород донектарианского возраста. Кратер Морет имеет в диаметре 115 км и, следовательно, глубина его экскавации составляет около 12 км, что превышает модельную мощность выбросов бассейна SPA в данной области (Ivanov и др., 2018), которая составляет примерно 800–1000 м, с расчетом по модели Fassett и др. (2011).

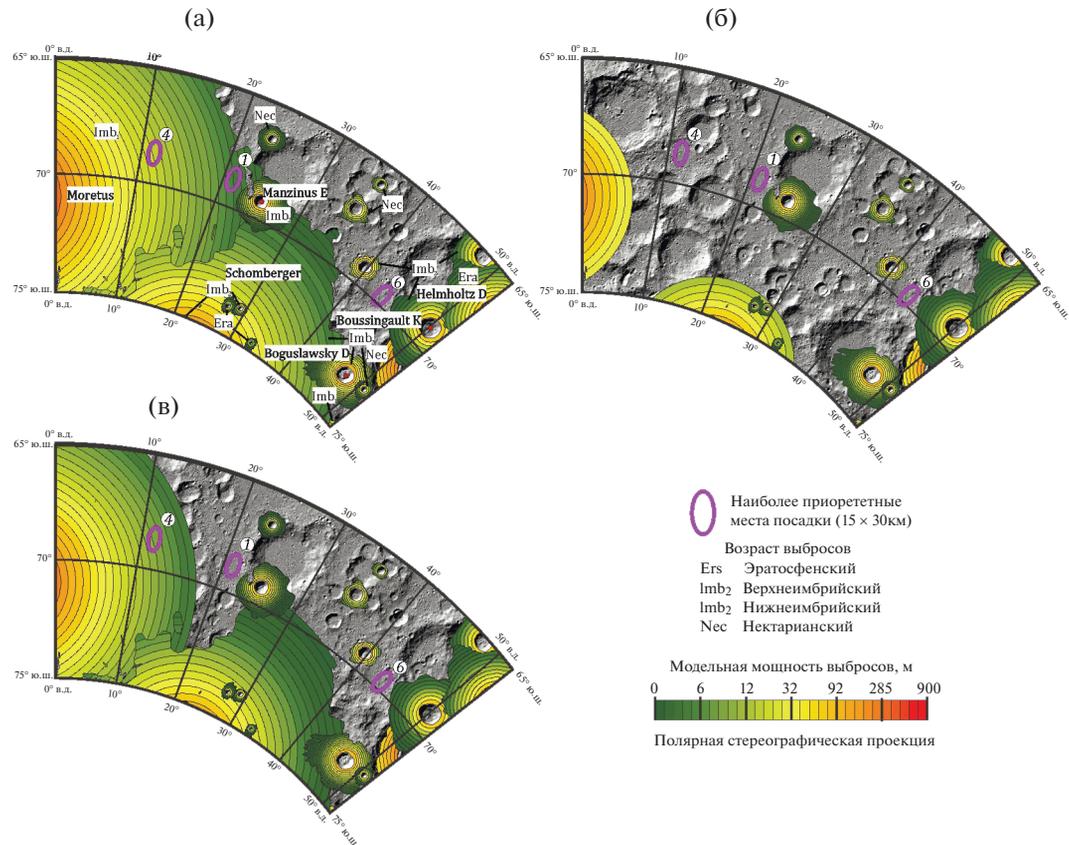


**Рис. 5.** Модельная мощность выбросов кратеров в районе южного полюса Луны коперниковского, эратосфенского, имбрийского и нектарианского возрастов с учетом фактора смещения по Petro и Pieters (2006).

Следовательно, выбросы кратера могут содержать вещество лунной коры, предшествовавшее ударному событию SPA, выброшенное с большой глубины и относящееся к наиболее древним этапам геологической истории Луны. Подстилающий материал, который с большой вероятностью должен присутствовать на поверхности в эллипсах 1 и 4, может представлять собой перемешанные ударной бомбардировкой выбросы бассейна

SPA. Таким образом, в пределах эллипсов 1 и 4 с большой долей вероятности может быть проанализировано вещество древнейшей лунной коры, представляющее ее разные глубинные горизонты: более глубинное – выбросы SPA, менее глубинное – выбросы кратера Морет.

В пределах эллипса 6 поверхность имеет донектарианский возраст и местный реголит преобладает над возможным привнесенным материалом



**Рис. 6.** Модельная мощность выбросов кратеров нектарианского—коперниковского возраста в районе посадки спускаемого аппарата Луна-25: (а) — без учета смещения материала; (б) — с учетом смещения материала по Oberbeck и др. (1975); (в) — с учетом смещения материала по Petro и Pieters (2006).

из более молодых кратеров. Вероятно, реголит в этом эллипсе представляет ударно переработанные выбросы бассейна SPA, которые, возможно, представляют собой более глубокие горизонты древнейшей лунной коры.

Если учитывать фактор смещения, то пропорция местного материала увеличится во всех эллипсах посадки и, следовательно, увеличится доля материала выбросов бассейна SPA.

## ВЫВОДЫ

В ходе работы было проведено изучение отложений выбросов ударных кратеров в южной полярной области Луны. Основным направлением исследования являлось определение мощностей выбросов в различных частях исследуемого района. Для этого были выбраны три формулы определения мощности, наиболее подходящие для кратеров разных размеров (формулы (3)–(5)). На основе этих моделей и новой геологической карты (Krasilnikov и др., 2021) была получена мощность выбросов кратеров южной полярной области.

Также, анализ включает в себя район посадки спускаемого аппарата Луна-25. Модели, предложенные для расчета мощности не учитывали смешение материала выбросов с местным реголитом. С целью определения воздействия данного явления на получившуюся модель были выполнены пересчеты с применением двух известных оценок фактора смешения (Oberbeck и др., 1975; Petro, Pieters, 2006), что позволило модифицировать исходную модель. Различия между модифицированными моделями вводят предварительные ограничения на возможные вариации мощности выбросов из кратеров в южной полярной области Луны. Наиболее наглядно эти ограничения выражаются в изменениях общей ширины зон, где доминирует выброшенный из кратера материал (рис. 2). Применение фактора смешения по формуле, предложенной Oberbeck и др. (1975), резко сужает зону, где выброшенный материал доминирует, и эта зона становится менее широкой, чем морфологически выраженная зона сплошных выбросов. Таким образом, данная формула дает, предположительно, нижний предел мощности

выбросов. Модификация формулы Oberbeck и др. (1975), предложенная в работе Petro и Pieters (2006), увеличивает ширину зоны, где значения фактора смешения остаются меньше единицы и, следовательно, доминирует выброшенный материал. Однако и в этом случае ширина таких зон, как правило, меньше ширины морфологически выраженных областей сплошных выбросов (рис. 2).

Неопределенность в точности моделей оценки мощности выбросов и смешения материала позволяет дать только приближенные значения мощности отложений кратеров, которые можно использовать для общего представления геологии района. В связи с этим для получения более подробной информации, требуются дополнительные исследования.

Работа была выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-17-00035: Оценка темпов экзогенного обновления поверхности Луны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Красильников С.С., Красильников А.С., Иванов М.А. Геологическая детализация основных эллипсов посадки Луна-25 // *Астрон. вестн.* 2022. Т. 56. № 3. С. 147–157. (Krasilnikov S.S., Krasilnikov A.S., Ivanov M.A. Geological Details of the Main Landing Ellipses of Luna-25 // *Sol. Syst. Res.* 2022. V. 56. № 3. P. 135–144. <https://doi.org/10.1134/S0038094622020058> <https://doi.org/10.31857/S0320930X22020050>)
- Boynton W.V., Droege G.F., Mitrofanov I.G., McClanahan T.P., Sanin A.B., Litvak M.L., Schaffner M., Chin G., Evans L.G., Garvin J.B., Harshman K., Malakhov A., Milikh G., Sagdeev R., Starr R. High spatial resolution studies of epithermal neutron emission from the lunar poles: Constraints on hydrogen mobility // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. E00H33. <https://doi.org/10.1029/2011JE003979>
- Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., Wooden D., Shirley M., Ennico K., Hermalyn B., Marshall W., Ricco A., Elphic R., Goldstein D., Summy D., Bart G., Asphaug E., Korycan-sky D., Landis D., Sollitt L. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // *Science.* 2010. V. 330. P. 463–468. <https://doi.org/10.1126/science.1186986>
- Fassett C.I., Head J.W., Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A. Thickness of proximal ejecta from the Orientale Basin from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: Implications for multi-ring basin formation // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. Iss. 17. L17201. <https://doi.org/10.1029/2011GL048502>
- Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B., Barraclough B.L., Elphic R.C., Lawrence D.J. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles // *Science.* 1998. V. 281. P. 1496–1500. <https://doi.org/10.1126/science.281.5382.1496>
- Feldman W.C., Elphic R.C., Barraclough B.L., Maurice S., Genetay I., Binder A.B. Polar hydrogen deposits on the Moon // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 4175–4195. <https://doi.org/10.1029/1999JE001129>
- 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.* 2001. V. 106. P. 23231–23251. <https://doi.org/10.1029/2000JE001444>
- Garrick-Bethell I., Zuber M.T. Elliptical structure of the lunar South Pole-Aitken basin // *Icarus.* 2009. V. 204. P. 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.05.032>
- Hiesinger H., Head J.W., Wolf U., Jaumann R., Neukum G. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts in Mare Frigoris and other nearside maria based on crater size-frequency distribution measurements // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. 1–22. <https://doi.org/10.1029/2009JE003380>
- Hiesinger H., van der Bogert C.H., Pasckert J.H., Schmedemann N., Robinson M.S., Jolliff B., Petro N. New crater size-frequency distribution measurements of the South Pole Aitken basin // *LPSC 43.* 2012. № 2863.
- Housen K.R., Schmidt R.E., Holsapple K.A. Crater ejecta scaling laws: fundamental forms based on dimensional analysis // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. Iss. B3. P. 2485–2499. <https://doi.org/10.1029/JB088iB03p02485>
- Ivanov M.A., Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Demidov N.E., Guseva E.N., Head J.W., Hiesinger H., Kohanov A.A., Krasilnikov S.S. Geological characterization of the three high-priority landing sites for the Luna-Glob mission // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 162. P. 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.08.004>
- Korotev R.L. Some things we can infer about the Moon from the composition of the Apollo 16 regolith // *Meteor. and Planet. Sci.* 1997. V. 32. Iss. 4. P. 447–478. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1997.tb01291>
- Krasilnikov S.S., Ivanov M.A., Head J.W. Geological map of the South pole of Moon // *LPSC 52.* 2021. № 1428.
- Lucey P.G. Mineral maps of the Moon // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. Iss. 8. L08701. <https://doi.org/10.1029/2003GL019406>
- McGetchin T.R., Settle M., Head J.W. Radial thickness variation in impact crater ejecta: implications for lunar basin deposits // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1973. V. 20. Iss. 2. P. 226–236. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90162-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90162-3)
- Melosh H.J. *Impact Cratering: A Geologic Process.* New York: Oxford Univ. Press, 1989. 253 p.
- 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 // *Geology.* 2017. V. 45. № 12. P. 1063–1066. <https://doi.org/10.1130/G39375.1>
- 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. № 6003. P. 483–486.  
<https://doi.org/10.1126/science.1185696>
- Mitrofanov I.G., Litvak I.M., Sanin A., Malakhov A., Golovin D., Boynton W., Droege G., Chin G., Evans L., Harshman K., Fedosov F., Garvin J., Kozyrev A., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M., Starr R., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Tretyakov V., Trombka J., Varenikov A., Vostrukhin A.* Testing polar spots of water-rich permafrost on the Moon: LEND observations on-board LRO // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. E00H27.  
<https://doi.org/10.1029/2011JE003956>
- Neukum G.* Different ages of lunar light plains // *The Moon*. 1977. V. 17. P. 383–393.  
<https://doi.org/10.1007/BF00562647>
- Oberbeck V.R., Hörz F., Morrison R.H., Quaide W.L., Gault D.E.* On the origin of the lunar smooth-plains // *The Moon*. 1975. V. 12. P. 19–54.  
<https://doi.org/10.1007/BF02626332>
- Petro N.E., Pieters C.M.* Modeling the provenance of the Apollo 16 regolith // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. Iss. E9. P. 1–13.  
<https://doi.org/10.1029/2005JE002559>
- Pike R.J.* Ejecta from large craters on the Moon: Comments on the geometric model of McGetchin et al. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1974. V. 23. Iss. 3. P. 265–271.  
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(74\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(74)90114-9)
- 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., Tretyakov 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>
- Schultz P.H., Gault D.E.* Clustered impacts: experiments and implications // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. Iss. B5. P. 3701–3732.  
<https://doi.org/10.1029/JB090iB05p03701>
- Sharpton V.L.* Outcrops on lunar crater rims: Implications for rim construction mechanisms, ejecta volumes and excavation depths // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. Iss. 1. P. 154–168.
- Smith D.E., Zuber M.T., Jackson G.B., Cavanaugh J.F., Neumann G.A., Riris H., Sun X., Zellar R., Coltharp C., Connelly J., Katz R., Kleyner I., Liiva P., Matuszeski A., Mazarico E., McGarry J., Novo-Gradac A., Ott M., Peters C., Ramos-Izquierdo L., Ramsey L., Rowlands D., Schmidt S., Scott V., Shaw G., Smith J., Swinski J., Torrence M., Unger G., Yu A., Zagwodzki T.* The Lunar Orbiter Laser Altimeter investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter mission // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150. P. 209–241.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-009-9512-y>
- Werner S.C.* Major aspects of the chronostratigraphy and geologic evolutionary history of Mars // Ph. D. thesis. Berlin: Cuvillier, 2005.
- Wilhelms D.E.* Geologic mapping of the second planet. Pt 1: Rationale and general methods of Lunar geologic mapping // *A Primer in Lunar Geology* / Eds Greeley R., Schultz P. Ames Research Center NASA, 1974. P. 199–215.
- Wilhelms D.E., Howard K.A., Wilshire H.G.* Geologic map of the South side of the Moon // USGS Map I-1162. 1979.  
<https://doi.org/10.3133/i1162>
- Wilhelms D.E., McCauley J.P., Trask N.J.* The geologic history of the Moon // USGS Numbered Series. Professional Paper. 1987. V. 1348. 302 p.  
<https://doi.org/10.3133/pp1348>
- Yamamoto S., Nakamura R., Matsunaga T., Ogawa Y., Ishihara Y., Morota T., Hirata N., Ohtake M., Hiroi T., Yokota Y., Haruyama J.* Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE // *Nature Geosci.* 2010. V. 3. P. 533–536.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo897>