

УДК 523.3

УДАРНАЯ ПЕРЕРАБОТКА РЕГОЛИТА В ПОЛЯРНЫХ РЕГИОНАХ ЛУНЫ

© 2022 г. А. Т. Базилевский^а, *, М. А. Креславский^б, В. А. Дорофеева^а, Юань Ли^с, ЛиГанг Фанг^с^аИнститут геохимии и аналитической химии РАН, Москва, Россия^бФакультет наук о Земле и планетах, Университет Калифорнии в Санта-Круз, Санта-Круз, Калифорния, США^сСучжоуский профессиональный университет, Сучжоу, Китай

*e-mail: atbas@geokhi.ru

Поступила в редакцию 25.11.2021 г.

После доработки 20.12.2021 г.

Принята к публикации 13.01.2022 г.

В статье, исходя из пространственной плотности малых ударных кратеров мы оценили минимальные, средние и максимальные толщины реголита и степени его ударной переработки в зависимости от глубины на днищах полярных кратеров Шумейкер, Свердруп и Шеклтон и в местах посадки КА Луна-16, -17 и -24. Ключевой параметр для этих расчетов — D_{cr} , диаметр кратера на границе между равновесной и неравновесной частями кратерной популяции. Он равен 80 м для места посадки КА Луна-24 и кратера Шеклтон, 100 м для мест посадки КА Луна-16 и -17, 350 м для кратера Свердруп и 1000 м для кратера Шумейкер. Средние толщины реголита для этих участков составили 3.2, 4, 14 и 40 м соответственно. Для этих участков количество переработок составило 1.6, 2, 7 и 20 для глубины 2 м; 3, 4, 14 и 40 раз для глубины 1 м; 6, 8, 28 и 80 раз для глубины 0.5 м; 16, 20, 70 и 200 раз для глубины 0.2 м; и 64, 80, 280 и 800 раз для глубины 0.05 м. Эти перерабатывающие удары должны механически перемешивать полярный реголит и вызывать многократное локальное испарение/конденсацию замороженных летучих веществ, приводящую к их физико-химической дифференциации.

Ключевые слова: Полярные регионы Луны, кратер, критический диаметр, реголит**DOI:** 10.31857/S0320930X2203001X

ВВЕДЕНИЕ

Реголит, содержащий водяной лед в полярных областях Луны, представляет большой интерес как для фундаментальной лунной науки, так и для практических нужд, таких как ресурс для жизнеобеспечения будущих лунных баз и топливо для космических полетов. В частности, обсуждаются времена привноса воды к полярным холодным ловушкам (см., например, Deutsch и др., 2020a; 2020b; Lawrence, 2017; Siegler и др., 2016) и эволюция содержащих лед отложений с течением времени (см., например, Li и др., 2018; Farrell и др., 2019). В данной статье мы рассматриваем часть второго вопроса, а именно вопрос об ударной переработке полярного реголита и его возможном влиянии на наличие в нем водяного льда и других льдов. Скорость образования кратеров в полярных областях Луны по сравнению с экваториальными областями ниже всего на ~20% (см., например, Le Feuvre, Wiczorek, 2008), поэтому для приблизительного рассмотрения ее можно считать одинаковой для всей лунной поверхности. Вопрос об ударной переработке лунного реголита рассматривался давно (см., например, Shoemaker и др., 1969; Gault и др., 1974; Базилевский, 1974), и, похоже, эти старые рассуждения в целом оста-

ются в силе. Недавно ряд исследователей вновь обратились к проблеме переработки реголита с помощью более сложных, подробных и громоздких моделей (см., например, Costello и др., 2018; Hirabayashi и др., 2018) и применили их к анализу водяного льда в полярных областях Луны (см., например, Hurley и др., 2012; Cannon и др., 2020; Costello и др., 2020). В данной статье мы применяем к вопросу о переработке полярного реголита простой аналитический подход Базилевского (1974), рассматривая характеристики популяции небольших (<1–2 км в диаметре) лунных кратеров.

Мы делаем это на примере днищ нескольких южнополярных кратеров Луны, кратко рассмотренных Li и др. (2021): кратер Шумейкер (диаметр $D = 52$ км, возраст $T = 4.16$ млрд лет), кратер Свердруп ($D = 33$ км, $T = 3.8$ млрд лет) и кратер Шеклтон ($D = 21$ км, $T = 3.15$ млрд лет) (Deutsch и др., 2020a). Мы сравниваем наши оценки с ранее сделанными Базилевским (1974) для мест посадки КА Луна-16 и Луна-17, где абсолютный возраст поверхности составляет 3.0–3.6 млрд лет (Wagren, 2003) и 3.35 млрд лет (Hiesinger и др., 2000) соответственно, и места посадки КА Луна-24, где абсолютный возраст поверхности составляет 3.2–3.4 млрд лет (Флоренский и др., 1980). Интересу-

ющие нас днища кратеров Шумейкер, Свердруп и Шеклтон постоянно затенены и “нормальных” телевизионных или фотоизображений для них нет. Поэтому для визуализации поверхности в исследуемых районах мы показываем полученные методом “отмывки” изображения участков 8×8 км на днищах кратеров Шумейкер, Свердруп и Шеклтон и в районе посадки КА Луна-17 (рис. 1).

Отмывка — это картографический способ изображения рельефа методом теневой пластики при косом или отвесном освещении (Вережачка, Ковалева, 2016). Отмывка создается с помощью компьютерных технологий на основе цифровой модели рельефа автоматическим способом в геоинформационных системах с учетом двух параметров: азимута и высоты (в угловой мере) источника освещения: чем меньше высота источника, тем эффективнее осуществляется затенение (Шихов и др., 2017; см. также https://studwood.ru/1201081/geografiya/kompyuternye_tehnologii_svetotenevoy_plastiki#835).

На рис. 1 видно, что поверхности днищ рассматриваемых кратеров и района посадки КА Луна-17 покрыты многочисленными кратерами (и еще более многочисленными мелкими кратерами, не видимыми при данном разрешении), образование которых должно было привести к рассматриваемой ниже переработке поверхностного слоя исследуемых участков.

МЕТОДИКА РАБОТЫ

Здесь мы приводим простые аналитические оценки переработки реголита малыми ударами по Базилевский (1974). Популяцию небольших лунных кратеров можно разделить на две части: равновесная субпопуляция более мелких кратеров и неравновесная (накапливающаяся) субпопуляция относительно более крупных кратеров (см., например, Trask, 1966; Shoemaker и др., 1970; Флоренский и др., 1972) с границей между ними на “критическом” диаметре кратера D_{cr} (рис. 2а).

Равновесная часть популяции представляет собой некоторый предел количества кратеров, которые могут одновременно существовать на поверхности. Неравновесная часть популяции и ее экстраполяция в область равновесия (пунктирные линии на рис. 2б) представляют собой совокупность кратеров, когда-либо образовавшихся на данной поверхности за время ее существования. Известно, что со временем значение D_{cr} увеличивается (Trask, 1966; Shoemaker и др., 1970; Флоренский и др., 1972) (рис. 2б). Величина D_{cr} является удобной характеристикой степени кратерированности поверхности. Она определяется при подсчете кратеров, как место пересечения равновесных и неравновесных частей графиков (рис. 2).

Количество кратеров (N) на единицу площади с диаметром больше D является степенной функцией D :

$$N_{>D} = CD^{-\gamma}, \quad (1)$$

где C и γ — постоянные, $C > 0$, $\gamma > 0$.

Для равновесной части популяции:

$$N_{>D} = C_e D^{-\gamma}, \quad (2)$$

где $\gamma = 2$, $C_e = 0.08$ (Trask, 1966; Shoemaker и др., 1970; Флоренский и др., 1972). Заметим, что в случае $\gamma = 2$ коэффициент C_e является безразмерным.

Для неравновесной части популяции:

$$N_{>D} = C_n D^{-\gamma}, \quad (3)$$

где $\gamma \approx 3$, а C_n зависит от возраста поверхности (Trask, 1966; Shoemaker и др., 1970; Флоренский и др., 1972). Здесь мы предполагаем, что для неравновесной субпопуляции $\gamma = 3$; в этом случае C_n имеет размерность длины, и все уравнения становятся особенно простыми.

На границе между равновесной и неравновесной субпопуляциями $C_e D_{cr}^{-2} = C_n D_{cr}^{-3}$, следовательно,

$$C_n = 0.08 D_{cr}. \quad (4)$$

Вариации толщины реголита и степени его переработки на разных глубинах можно оценить, зная площадь, занимаемую кратерами того или иного диаметра, и характерное отношение глубины кратера H к его диаметру D . В качестве приближения мы принимаем, что совершенно неразрушенный кратер имеет $H/D = 0.2$.

Долю площади, занимаемой всеми кратерами с диаметром больше D , можно рассчитать путем интегрирования вкладов кратеров всех диаметров:

$$S_{>D} = \int_D^{\infty} \frac{\pi}{4} (D')^2 dN_{>D'}, \quad (5)$$

где D' — переменная интегрирования. Чтобы учесть все когда-либо образовавшиеся кратеры, нам нужно использовать здесь неравновесную функцию распределения по размерам (уравнение (3)), которая дает:

$$S_{>D} = 2.5 C_n / D. \quad (6)$$

Конечно, доля площади, занимаемой всеми когда-либо образовавшимися кратерами $S_{>D}$, может быть больше единицы, что отражало бы перекрытие кратеров.

Следуя (Shoemaker и др., 1969), мы полагаем, что переработка реголита на глубину больше H требует, чтобы поверхность дважды перекрывалась кратерами, глубина которых больше H , другими словами:

$$S_{>D} = 2. \quad (7)$$

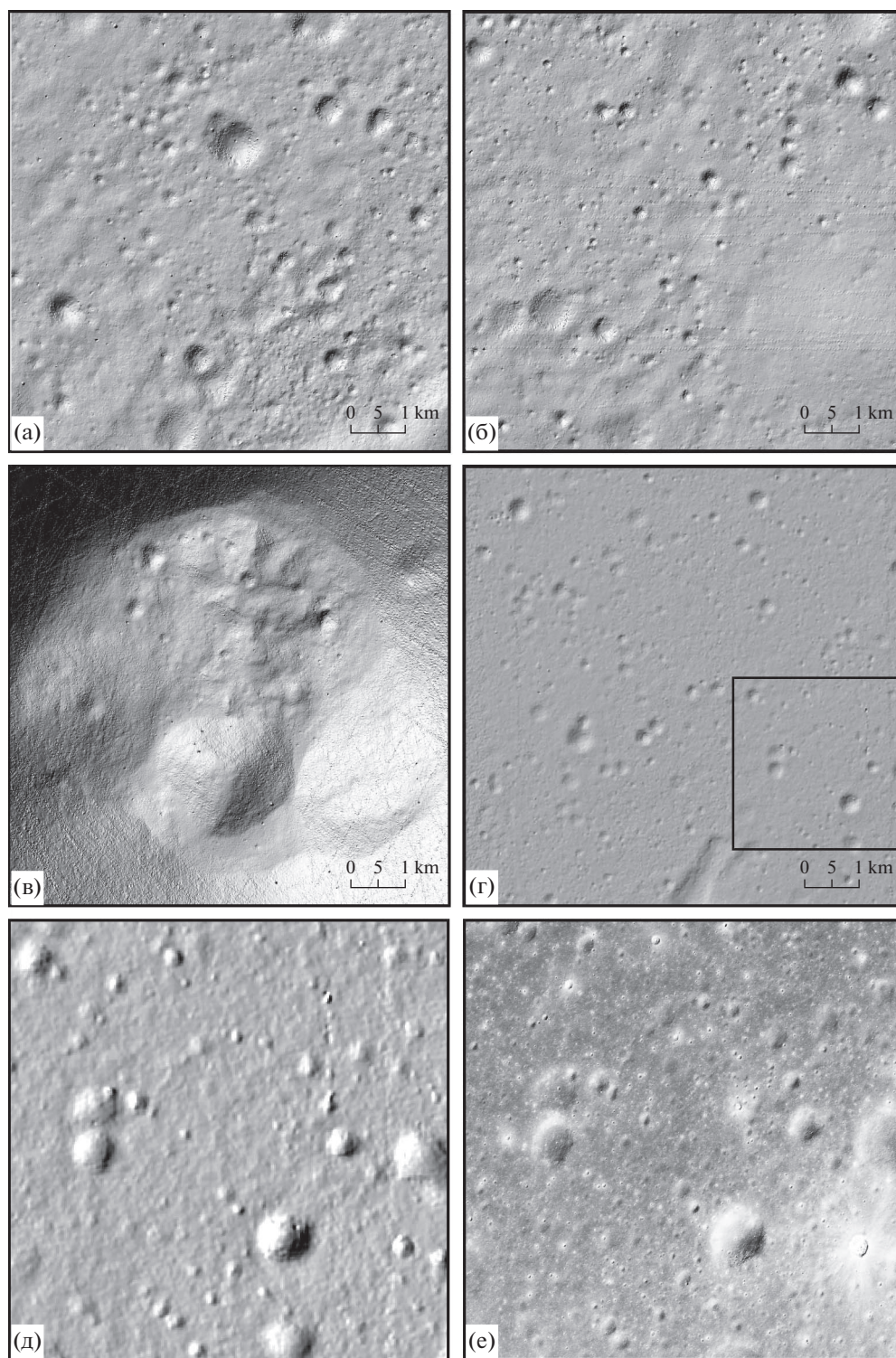


Рис. 1. Изображения, полученные методом “отмывки” на участки днищ кратеров Шумейкер (а), Свердруп (б) и Шелтон (в) с использованием цифровой модели поверхности по данным LOLA (http://pds-geosciences.wustl.edu/lro/lro-l-lola-3-rdr-v1/lrolol_1xxx/browse/lola_gdr/), и изображение, полученное методом “отмывки” на участок поверхности в районе работы Лунохода-2 (г) с использованием цифровой модели поверхности по данным фотограмметрического анализа снимков, полученных с LROC NAC (<http://cartsrv.mexlab.ru/geoportal/>). Разрешение изображений 10 м/пиксел, азимут освещения 135°, угол освещения 30° над горизонтом. Части (д) и (е) это, соответственно, изображение, полученное методом “отмывки” и фрагмент полученного с LROC NAC снимка M1105709502LC на участок поверхности с размером 3 × 3 км, показанный на части (г) данного рисунка (черный квадрат). Разрешение обоих изображений 4 м/пиксел, азимут освещения 110°, угол освещения 45° над горизонтом.

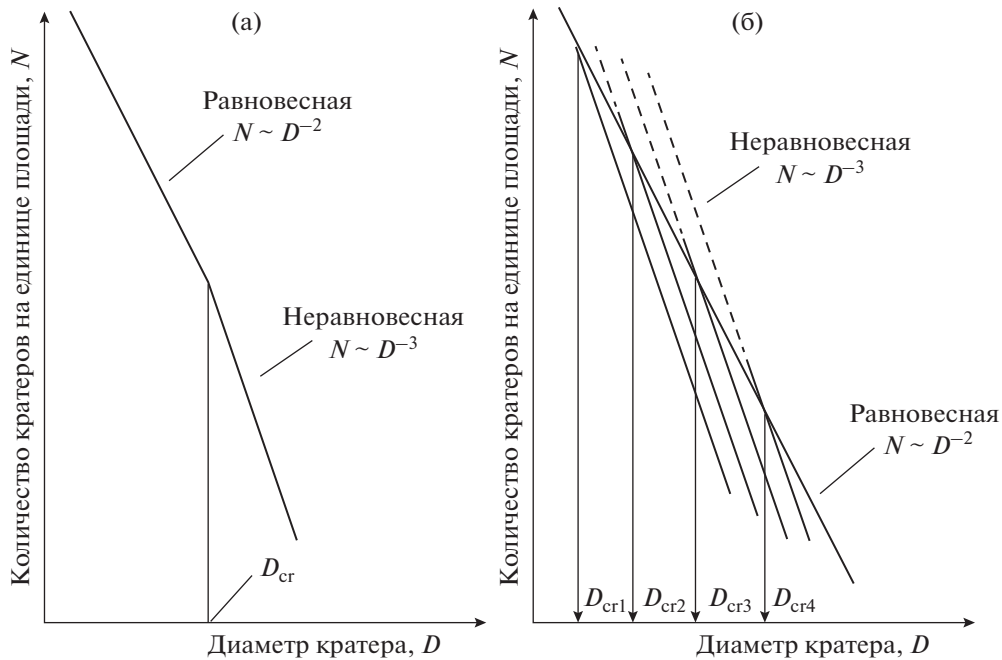


Рис. 2. (а) Схематический график количества кратеров (N) с диаметром более D на единице площади поверхности, как функция D ; по обеим осям масштаб логарифмический; D_{cr} это граничный диаметр между равновесной и неравновесной субпопуляциями. (б) Такой же график, показывающий увеличение D_{cr} с течением времени.

Переработка n раз требует покрытия кратерами $2n$ раз:

$$S_{>D} = 2n. \quad (8)$$

Из (6) и (8) получаем:

$$2.5C_n/D = 2n. \quad (9)$$

Мы знаем, что $H = 0.2D$ и $C_n = 0.08 D_{cr}$. Тогда глубина переработки кратерами составляет:

$$H = D_{cr}/50n. \quad (10)$$

Случайный характер пространственного распределения кратеров по площади приводит к вариации глубины переработки от места к месту. Эти вариации могут быть представлены как минимальная, средняя и максимальная толщина:

1) Минимальная толщина реголита H_{min} — это толщина в том месте, где переработка была на минимальную для этого участка глубину. Она рассчитана из (10) для случая $n = 1$.

2) Средняя толщина реголита H_{med} представляет собой медианное значение (частота 50%) в распределении толщин на данном участке. Она рассчитывается из (4) и (6) в предположении, что $S_{>D} = 4$.

3) Максимальная толщина реголита H_{max} — это глубина самого крупного и полностью разрушенного и погребенного кратера на данном участке, т.е. глубина кратера с диаметром, равным D_{cr} .

Можно показать, что:

$$H_{min} = D_{cr}/50, \quad (11)$$

$$H_{med} = D_{cr}/25, \quad (12)$$

$$H_{max} = D_{cr}/5. \quad (13)$$

Уравнение (10) можно использовать для оценки степени переработки материала реголита до некоторой глубины. Этот параметр представляет собой количество актов переработки кратерами соответствующей глубины в каждом месте поверхности. Тогда количество таких актов на глубине $\geq H$ (медианная оценка) равно:

$$n(H) = D_{cr}/25H. \quad (14)$$

Этот параметр показывает количество действий повторной обработки на глубине $\geq H$, но игнорирует тот факт, что на глубинах меньше H количество актов переработки намного больше, и чем меньше глубина, тем больше количество актов переработки. Для ряда задач полезно оценить среднее количество актов переработки до глубины H , которое обозначим как $n_{av}(H)$. Эффект такой, как если бы количество переработок до глубины H было бы одинаковым вдоль всей H и равным $n_{av}(H)$. Усреднение следует выполнять в интервале значений от H до H_0 , где H_0 — минимально возможная глубина переработки реголита. Очевидно, что величина H_0 близка к величине среднего диаметра частиц реголита (~ 0.1 мм). И учитывая формулу (14) при $H \gg H_0$ (т.е. $H - H_0 \approx H$), получаем:

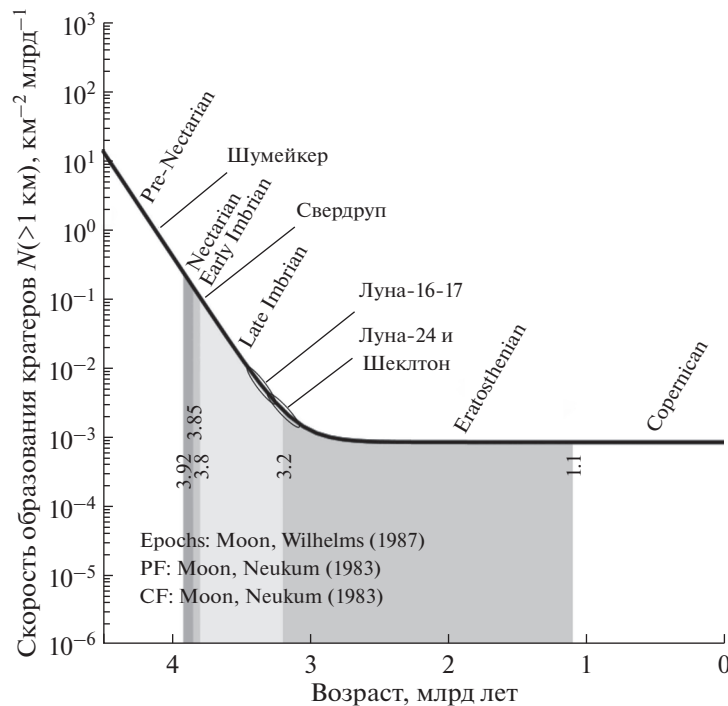


Рис. 3. Интенсивность образования ударных кратеров на Луне как функция времени в соответствии с хронологической системой Neukum (1983). Границы геологических эпох даны по Wilhelms (1987) (числовые значения взяты из главы 14 этого исследования).

$$n_{av}(H) = \frac{1}{H} \int_{H_0}^H n(H') dH' \approx D_{cr}/25H \times 2.3 \lg(H/H_0) = n \times 2.3 \lg(H/H_0). \quad (15)$$

Интересно сравнить наши грубые результаты с результатами, полученными с использованием более сложных и детальных моделей переработки реголита. Hirabayashi и др. (2018) представили аналитическую модель накопления реголита с реалистической геометрией кратеров. Модель включает семь параметров. Три безразмерных параметра описывают реалистическую геометрию кратеров и их выбросов, мы использовали те же их значения, что и в этой упомянутой статье. Еще параметр — это максимальные размеры кратеров, влияющие на накопление реголита; поскольку функция образования кратеров для малых кратеров крутая, их значения мало влияют на среднюю толщину реголита. Наконец, два параметра описывают накопление реголитаобразующих кратеров, в наших обозначениях это показатель степени γ и фактор C_n в нашей формуле (3). Мы приняли $\gamma = 3$ (Hirabayashi и др. (2018) использовали $\gamma = 3.2$) и нашу формулу (4) для C_n . Подставив эти значения в интегральную формулу для средней толщины реголита (уравнение (18) в статье Hirabayashi и др. (2018)), мы аналитически получили среднюю толщину реголита, пропорциональную

D_{cr} , точно так же, как в нашем уравнении (12). Безразмерный коэффициент пропорциональности выражается в виде довольно громоздкого интегрального выражения, которое мы рассчитали численно и получили значение $\sim 1/15$, что, учитывая очень грубый характер наших предположений, прекрасно согласуется с величиной $1/25$, которую мы использовали в формуле (12).

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Ниже мы рассчитываем минимальную, среднюю и максимальную толщину реголита на днищах кратеров Шумейкер ($D = 52$ км, $T = 4.16$ млрд лет), Свердруп ($D = 33$ км, $T = 3.8$ млрд лет) и Шеклтон ($D = 21$ км, $T = 3.15$ млрд лет) и для сравнения приводим оценки для районов посадки КА Луна-16, -17 и -24, которые частично были даны Базилевским (1974) (рис. 3).

Также для этих участков мы рассчитали количество (n) актов переработки вниз до глубин 2, 1.5, 1, 0.5, 0.2 и 0.05 м, а также средние количества (n_{av}) переработок до этих глубин (см. таблицу). Ключевой параметр для этих расчетов (D_{cr}) для районов посадки КА Луна-16, -17 и -24 был ранее определен Florensky и др. (1972) и Флоренским и др. (1974; 1980), а для кратеров Шумейкер, Свердруп и Шеклтон теперь определялся как диаметр пересечения графика равновесной плот-

Степень ударной переработки реголита в районах посадки КА Луны-16, -17 и -24 и на днищах кратеров Шеклтон, Свердруп и Шумейкер

Параметр	Луна-24	Луна-16, -17	Шеклтон	Свердруп	Шумейкер
D_{cr} , м	80	100	~80	~350	~1000
Интенсивность кратерообразования*	2.5	6	2.5	200	1000
H_{min} , м	1.6	2	1.6	7	20
H_{med} , м	3.2	4	3.2	14	40
H_{max} , м	16	20	16	70	200
n для $H = 2$ м	1.6	2	1.6	7	20
n_{av} для $H = 2$ м	16	20	16	69	198
n для $H = 1.5$ м	~2	~3	~2	9	27
n_{av} для $H = 1.5$ м	19	29	19	87	260
n для $H = 1$ м	~3	4	~3	14	40
n_{av} для $H = 1$ м	28	37	28	129	368
n для $H = 0.5$ м	6	8	6	28	80
n_{av} для $H = 0.5$ м	51	68	51	238	681
n для $H = 0.2$ м	16	20	16	70	200
n_{av} для $H = 0.2$ м	121	150	121	531	1518
n для $H = 0.05$ м	64	80	64	280	800
n_{av} для $H = 0.05$ м	397	500	397	1739	4968

*Интенсивность кратерообразования в Эратосфенский и Коперниковский периоды принята равной 1.

ности ($C_e = 0.08D^{-2}$) с графиками неравновесной плотности кратеров, взятыми из статей (Тье и др., 2015 — из их рис. 4) и (Deutsch и др., 2020а — из их рис. 3).

Из таблицы видно, что рассчитанная нами медианная мощность реголита в местах посадки КА Луна-16, -17 и -24 составляет от 3.2 до 4 м, что согласуется с оценками средней мощности и ее стандартных отклонений для реголита в лунных морях по радиолокационным данным, полученным в Аресибо (Shkuratov, Bondarenko, 2001). Для района посадки КА Луна-24 мы также оценили среднюю мощность реголита по величине диаметра плоскодонных кратеров, следуя методике Bart и др. (2011). Там были идентифицированы 30 плоскодонных кратеров с диаметрами от 17 до 130 м, медианный диаметр 47 м, что привело к оценкам мощности реголита от 1.7 до 6.2 м, с медианной мощностью 3.9 м, что близко к оценке, приведенной в таблице. Средняя толщина реголита на дне относительно молодого (3.15 млрд лет) кратера Шеклтон оказалась равной 3.2 м, что, учитывая близость возрастов поверхности в районе посадки КА Луна-24 и в пределах кратера Шеклтон (см. рис. 3), выглядит разумным. Средняя мощность реголита на дне более старого кратера Свердруп (3.8 млрд лет) составила 14 м, что хорошо согласуется с результатами из (Shkuratov, Bondarenko, 2001 — их рис. 11). Эти совпадения указывают на

то, что наш подход к оценке толщины лунного реголита с использованием значения D_{cr} является верным, и дают возможность считать приемлемой нашу оценку средней мощности реголита (40 м) на дне самого старого из рассматриваемых кратеров Шумейкер (4.16 млрд лет).

Нейтронная спектрометрия, показавшая наличие водорода (вероятно, в форме водяного льда) в реголите полярных областей Луны, имеет глубину зондирования 1–2 м (см., например, Feldman и др., 2000; Mitrofanov и др., 2010; Sanin и др., 2017). Как следует из таблицы, на днищах полярных кратеров Шеклтон, Свердруп и Шумейкер реголит был переработан (n в таблице) 1.6, 2, 7 и 20 раз до глубины 2 м и 3, 4, 14 и 40 раз до глубины 1 м. На меньшие глубины реголит на днищах этих трех кратеров был переработан 6, 8, 28 и 80 раз (глубина 0.5 м), 16, 20, 70 и 200 раз (0.2 м) и 64, 80 раз. 280 и 800 (0.05 м). Средние количества переработок (n_{av} в таблице), учитывающих события на меньших глубинах, намного больше.

ВЛИЯНИЕ УДАРНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НА ЛЕД (ЛЬДЫ) В ПОЛЯРНОМ РЕГОЛИТЕ

Реголит в полярных областях Луны, по-видимому, накапливался и перерабатывался так же, как и в других лунных областях. Оцененное содержание водяного льда в полярном реголите не-

велико, от нескольких десятых процента по массе до нескольких процентов (Feldman и др., 2000; Colaprete и др., 2010; Mitrofanov и др., 2010; Sanin и др., 2017). Поэтому, вероятно, лед в таких количествах не оказывает существенного влияния на процесс накопления и переработки реголита. Об этом также можно сделать вывод из наблюдений глубин следов каменных валунов, указывающих на то, что механическая прочность полярного реголита очень близка к механической прочности реголита в других областях Луны (Sargeant и др., 2019; Bickel, Kring, 2020). Обычно предполагается, что по содержанию льда полярный реголит имеет двухчленное строение: верхний слой полярного реголита толщиной от сантиметров до нескольких дециметров является “сухим” слоем, бедным водяным льдом и другими летучими веществами, и нижний слой, обогащенный летучими (см., например, Salvail, Fanale, 1994; Vasavada и др., 1999; Mitrofanov и др., 2010). Но, учитывая рассмотренную выше ударную переработку, это предположение, вероятно, следует рассматривать как довольно приблизительную схему. Ударная переработка случайным образом перемещает части нижнего лед-содержащего материала вверх и захоранивает верхние “сухие” части, усложняя двухчленное строение.

Важно отметить, что в этом процессе некоторая часть материала реголита при каждом ударе проходит стадию сжатия. Если сжатие небольшое, что типично на относительно больших расстояниях от точки удара, оно должно приводить к трению между зернами, а это приведет к умеренному нагреву с таянием и испарением водяного льда и других льдов. Ближе к точке удара нагрев намного эффективнее. Ударники, бомбардирующие лунную поверхность, имеют скорости от ~2.5 до ~70 км/с при средней скорости ~17 км/с (см., например, Le Feuvre, Wiczorek, 2008; Melosh, 2011; Werner, Ivanov, 2015). Удары с такими скоростями должны привести к очень сильному нагреву, особенно если мишень пористая, как в случае рассматриваемого реголита. Наземные наблюдения в Национальной обсерватории Афин (проект NELIOTA) привели к обнаружению 112 световых вспышек на поверхности Луны, что позволило оценить массы ударников и температуры этих вспышек (Avdellidou, Vaubaillon, 2019; Avdellidou и др., 2021). Установлено, что ударники имеют сантиметровый-дециметровый диапазон диаметров, а яркостная температура вспышек находится в пределах от 1000 до 7000 К при средней температуре ~2700 К. Эти наблюдения можно отнести к рассмотренным нами глубинам переработки реголита. Такие высокие температуры находятся в объемах, сопоставимых с объемами ударников, но с течением времени объемы подвергшегося такому нагреву вещества становятся значительными. Из исследований образцов реголита, доставлен-

ных миссиями Apollo и Луна, мы знаем, что они обычно содержат десятки процентов ударного расплава различного состава в виде индивидуальных обломков и так называемых агглютинатов — агрегатов мелких обломков, сцементированных ударным расплавом (см., например, МсКау и др., 1991). Для образования последних необходимы температуры 1200–1700 К, что даже ниже температур, оцененных в проекте NELIOTA.

Что касается полярного реголита, это вызванное ударами нагревание должно привести к испарению и, возможно, частичному разложению по крайней мере части замороженных летучих веществ. Испарившиеся летучие частично уходят в открытый космос, но некоторая их часть встречается с местными холодными материалами и конденсируется на них. Производительность такого испарения/конденсации должна зависеть от летучести и конденсационной способности отдельных химических веществ. Если это испарение/конденсация является многократным, а это должно быть так, если рассматривать относительно длительные периоды времени, то это должно приводить к физико-химической дифференциации полярных летучих — разделению элементов и химических соединений и частичному уходу в открытый космос некоторых из них, а также к изотопным сдвигам (например, отношения D/H). Таким образом, рассматривая состав летучих, захваченных в полярном реголите, следует иметь в виду не только различие в их потенциальных источниках, но и указанную дифференциацию. Этот аспект полярных летучих веществ требует специального изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из вышеизложенного, на основе плотностей распределения малых ударных кратеров на днищах полярных кратеров Шумейкер, Свердруп и Шеклтон и в районах посадки КА Луна-16, -17 и -24 мы оценили минимальную, среднюю и максимальную толщины реголита и степени его ударной обработки для глубин 2, 1.5, 1, 0.5, 0.2 и 0.05 м. Ключевой параметр для этих расчетов — D_{cr} , т.е. диаметр кратера на границе между равновесной и неравновесной частями популяции кратеров, оказался равным 80 м для района посадки КА Луна-24 и кратера Шеклтон, 100 м для районов посадки КА Луна-16 и -17, 350 м для кратера Свердруп и 1000 м для кратера Шумейкер. Средние толщины реголита для этих участков составили 3.2, 4, 14 и 40 м соответственно. Для этих участков количество переработок составило 1.6, 2, 7 и 20 для глубины 2 м; 3, 4, 14 и 40 раз для глубины 1 м; 6, 8, 28 и 80 раз для глубины 0.5 м; 16, 20, 70 и 200 раз для глубины 0.2 м и 64, 80, 280 и 800 раз для глубины 0.05 м. Эти перерабатывающие удары должны механически перемешивать полярный

реголит и вызывать множественное локальное испарение/конденсацию замороженных летучих веществ, приводящее к их физико-химической дифференциации.

Авторы признательны Б.А. Иванову, О.И. Яковлеву, М.В. Герасимову, А.Б. Санину, И.П. Карачевцевой и Tiantian Liu за помощь в этой работе. Работу улучшили замечания двух анонимных рецензентов.

Работа была финансово поддержана грантом Российского научного фонда № 21-17-00035: Оценка темпов экзогенного обновления поверхности Луны для А.Т. Базилевского и грантом Департамента образования Цзянсу, проект № 20KJD160001 для Юань Ли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевский А.Т. Оценка мощности и степени переработки лунного реголита по распространенности кратеров // Космич. исслед. Т. XII. Вып. 4. 1974. С. 606–609.
- Вережачка Т.В., Ковалева О.В. Изображение рельефа на картах: Теория и методы (оформительский аспект). М.: Научный мир, 2016. 184 с.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Гурштейн А.А., Зежин Р.Б., Пронин А.А., Полосухин В.П., Попова З.В., Таборко И.М. К проблеме строения поверхности лунных морей // Современные представления о Луне. М.: Наука, 1972. С. 21–45.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Пронин А.А. Геолого-морфологическая характеристика района посадки автоматической лунной станции “Луна-16” // Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974. С. 19–22.
- Флоренский К.П., Пронин А.А., Базилевский А.Т. Геология места посадки Луны 24 // Лунный грунт из Моря Кризисов. М.: Наука, 1980. С. 7–17.
- Шихов А.Н., Черепанова Е.С., Пьянков С.В. Геоинформационные системы: Методы пространственного анализа: Учебное пособие. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. 88 с.
- Avdellidou C., Munaibari E., Larson R., Vaubaillon J., Delbo M., Hayne P., Wieczorek M., Sheward D., Cook A. Impacts on the Moon: Analysis methods and size distribution of impactors // Planet. and Space Sci. 2021. V. 200. 105201. P. 1–22.
- Avdellidou C., Vaubaillon J. Temperatures of lunar impact flashes: mass and size distribution of small impactors hitting the Moon // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2019. V. 484. P. 5212–5222.
- Bart G.D., Nickerson R.D., Lawder M.T., Melosh H.J. Global survey of lunar regolith depths from LROC images // Icarus. 2011. V. 215(2). P. 485–490. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.07.017>
- Bickel V.T., Kring D.A. Lunar south pole boulders and boulder tracks: Implications for crew and rover traverses // Icarus. 2020. V. 348. article id. 113850. 17 p.
- Cannon K.M., Britt D.T. A geologic model for lunar ice deposits at mining scales // Icarus. 2020. V. 347. 113778. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113778>
- Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., Wooden D., Shirley M., Ennico K., Hermalyn B., Marshall W., Ricco A., Elphic R.C., Goldstein D., Summy D.D., Bart G.D., Asphaug E., Korycansky D., Landis D., Sollitt L. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // Science. 2010. V. 330. P. 463–468.
- Costello E.S., Ghent R.R., Lucey P.G. The mixing of lunar regolith: Vital updates to a canonical model // Icarus. 2018. V. 314. P. 327–344. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.05.023>
- Costello E.S., Ghent R.R., Hirabayashi M., Lucey P.G. Impact gardening as a constraint on the age, source, and evolution of ice on Mercury and the Moon // J. Geophys. Res.: Planets. 2020. V. 125(3), e06172. <https://doi.org/10.1029/2019je006172>
- Deutsch A.N., Head J.W., Neumann G.A. Analyzing the ages of south polar craters on the Moon: Implications for the sources and evolution of surface water ice // Icarus. 2020a. V. 336. 113455.
- Deutsch A.N., Head J.W., Neumann G.A., Kreslavsky M.A., Barker M.K. Assessing the roughness properties of circumpolar lunar craters: Implications for the timing of water-ice delivery to the Moon // Geophys. Res. Lett. 2020b. V. 47. № 15. e2020GL087782.
- Farrell W.M., Hurley D.M., Poston M.J., Hayne P.O., Szalay J.R., McLain J.L. The young age of the LAMP-observed frost in lunar polar cold traps // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. P. 8680–8688.
- Feldman W.C., Lawrence D.J., 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. № E2. P. 4175–4195.
- Florensky K.P., Basilevsky A.T., Gurshtein A.A., Zsetsky V.V., Zezin R.B., Pronin A.A., Popova Z.V. Geomorphological analysis of the area of Mare Imbrium explored by the automatic roving vehicle Lunokhod 1. Space Research XII. Berlin: Akademie-Verlag, 1972. P. 107–121.
- Gault D., Hörz F., Brownlee D., Hartung J. Mixing of the lunar regolith // Proc. 5th Lunar Conf. Suppl. Geochim. et Cosmochim. Acta. 1974. V. 3. P. 2365–2386.
- Hiesinger H., Jaumann R., Neukum G., Head J.W. Ages of mare basalts on the lunar nearside // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № E12. P. 29,239–29,275.
- Hirabayashi M., Howl B.A., Fassett C.I., Soderblom J.M., Minton D.A., Melosh H.J. The role of breccia lenses in regolith generation from the formation of small, simple craters: Application to the Apollo 15 landing site // J. Geophys. Res.: Planets. 2018. V. 123. P. 527–543. <https://doi.org/10.1002/2017JE005377>
- Hurley D.M., Lawrence D.J., Bussey D.B.J., Vondrak R.R., Elphic R.C., Gladstone G.R. Two-dimensional distribution of volatiles in the lunar regolith from space weathering simulations. // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L. 09203.
- Lawrence D.J. A tale of two poles: Toward understanding the presence, distribution, and origin of volatiles at the polar regions of the Moon and Mercury // J. Geophys. Res.: Planets. 2017. V. 122. P. 21–52.

- Le Feuvre M., Wieczorek M.A.* Nonuniform cratering of the terrestrial planets // *Icarus*. 2008. V. 197. P. 291–306.
- 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 // *Proc. Nation. Acad. Sci.* 2018. V. 115(36). P. 8907–8912.
- Li Yuan, Basilevsky A.T., Kreslavsky M.A., Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L.* Analysis of surface roughness vs WEH values in the regolith of the lunar South pole area // 52nd Lunar and Planet. Sci. Conf. 2021 (LPI Contrib. No 2548). Abs. 1871.
- Melosh H.J.* Planetary Surface Processes. Cambridge Univ. Press, 2011. 500 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. P. 483–486.
- McKay D.S., Heiken G., Basu A., Blanford G., Simon S., Reedy R., French B.M., Papike J.* The lunar regolith // *Lunar Source Book*. Cambridge Univ. Press, 1991. P. 285–356.
- Neukum G.* Meteoriten bombardement und Datierung planetarer Oberflächen // Habilitation Thesis for Faculty Membership. Univ. of Munich, 1983. 186 p. (English translation, 1984: Meteorite bombardment and dating of planetary surfaces <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19840027189>).
- Salvail J.R., Fanale F.P.* Near-surface ice on Mercury and the Moon: A topographic thermal model // *Icarus*. 1994. V. 111. P. 441–455.
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Bakhtin B.N., Bodnarik J.G., Boynton W.V., Chin G., Evans L.G., K. Harshman., 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.
- Sargeant H.M., Bickel V.T., Honniball C.I., Martinez S., Rogaski A., Bell S., Czaplinski E.C., Farrant B.E., Harrington E.M., Tolometti G.D., Kring D.A.* Determining the bearing capacity of permanently shadowed regions of the Moon using boulder tracks // *The 50th Lunar and Planet. Sci. Conf.* 2019. (LPI Contrib. No 2132). Abs. 1792.
- Shkuratov Y., Bondarenko N.* Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data // *Icarus*. 2001. V. 149(2). P. 329–338.
- Shoemaker E.M., Batson R.M., Holt H.E., Morris E.C., Rennilson J.J., Whitaker E.A.* Observations of the lunar regolith and the Earth from the television camera on Surveyor 7 // *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74(25). P. 6081–6119.
<https://doi.org/10.1029/jb074i025p06081>
- Shoemaker E.M., Hait M.H., Swann G.A., Schleicher D.I., Dahlem D.H., Schaber G.G., Sutton R.L.* Origin of the lunar regolith at Tranquillity Base. Physical properties // *Proc. Apollo 11 Sci. Conf. Vol. III. Geochim. et Cosmochim. Acta. Suppl. 1* / Ed. Levinson A.A. Pergamon Press, 1970. P. 2399–2412.
- Siegler M.A., Miller R.S., Keane J.T., Laneville M., Paige D.A., Matsuyama I., Lawrence D.J., Crotts A., Poston M.J.* Lunar true polar wander inferred from polar hydrogen // *Nature*. 2016. V. 531(7595). P. 480–484.
- Trask N.J.* Size and spatial distribution of craters estimated from Ranger photographs: Rangers VIII and IX. Pt. II of Experimenters' analyses and interpretations // *JPL Tech. Rept.* 32800. 1966. P. 252–263.
- Tye A.R., Fassett C.I., Head J.W., Mazarico E., Basilevsky A.T., Neumann G.A., Smith D.E., Zuber M.T.* The age of lunar south circumpolar craters Haworth, Shoemaker, Faustini, and Shackleton: Implications for regional geology, surface processes, and volatile sequestration // *Icarus*. 2015. V. 255. P. 70–77.
- Vasavada A.R., Paige D.A., Wood S.E.* Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits // *Icarus*. 1999. V. 141. P. 179–193.
- Warren P.H.* The Moon // *Treatise on Geochemistry*. V. 1. Meteorites, Comets, Planets. 2003. Elsevier Ltd., P. 559–599.
- Werner S.C., Ivanov B.A.* Exogenic dynamics, cratering, and surface ages // *Treatise on Geophysics*. Second Edition. 2015. P. 327–365.
- Wilhelms D.* Geologic history of the Moon // *USGS Special Paper 1348*, Washington, DC: US Gov. Publ. Office. 1987. 302 p., 12 plates.