

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
АКАДЕМИЯ НАУК СССР

К.П.ФЛОРЕНСКИЙ, А.Т.БАЗИЛЕВСКИЙ, Н.Е.ГРЕБЕННИК

**МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ЗРЕЛОСТЬ МЕЛКИХ ЛУННЫХ КРАТЕРОВ КАК ФУНКЦИЯ ИХ
ВОЗРАСТА И РАЗМЕРОВ**

1970

In the paper morphological classification of small lunar craters was used [1]. Craters were divided between 5 classes: A — very sharp and fresh, AB — rather sharp, B — somewhat softened, BC — quite shallow and blurry, C — very shallow and soft. Large scale Lunar Orbiter photos of mare regions were investigated to find overlapping and cross-sectioning craters, whose diameters were between 60 m and 2500 m. It was found that between craters of the same diameters more soft and matured craters were more ancient than fresh ones. Between craters of the same morphological maturity larger ones were more ancient. These relations are illustrated in the scheme, which reflects semiquantatively the correlations between time of crater existence (as a whole and in A, AB, B, BC, C class states) and crater sizes.

В работе [1] была показана необходимость деления кратеров по степени морфологической выраженности на несколько морфологических классов. В настоящее время используется разделение мелких кратеров на 5 классов — А, АВ, В, ВС и С. У кратеров класса А наиболее резко выраженные формы рельефа. Они имеют наибольшую относительную глубину, часто окружены четко выраженным валом. Кратеры класса С представляют другой крайний член этого ряда. Они плохо выражены в рельефе, относительная глубина их наименьшая, края кратеров сильно сглажены, вал наблюдается в очень редких случаях и всегда пологий. Одним из возможных объяснений морфологического разнообразия кратеров является предположение, что степень морфологической выраженности кратера является функцией его возраста, и резко выраженные формы — наиболее молодые, а сильно сглаженные — наиболее древние.

По аналогии с земной геоморфологической терминологией в дальнейшем будем называть кратеры с резкими четкими формами — свежими, а кратеры с расплывчатыми неясными формами — геоморфологически зрелыми. За критерий относительной молодости

или древности можно принять взаимные пересечения или наложения кратеров — из двух пересекающихся кратеров более молодым является секущий. На крупномасштабных фотографиях лунной поверхности видно, что в большинстве случаев секущий кратер является морфологически более четко выраженным, т. е. менее зрелым.

Однако исключения из этого правила — пересечения свежих форм зрелыми, — хотя и не столь многочисленны, но также встречаются и требуют объяснения. Причиной этого явления в рамках рассматриваемой гипотезы может быть заметная разница в скорости эволюции кратеров, когда, развиваясь по одинаковой схеме $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C$, один из кратеров (секущий) в своем развитии обгоняет другой (пересекаемый). В рамках других гипотез возможным объяснением этого явления может также быть особый механизм образования кратеров разных типов (например, просадка или просыпание грунта в трещину в скальном основании), для которого схема морфологической эволюции будет иной.

Для выяснения связи между степенью морфологической выраженности кратеров и их возрастом было проведено исследование взаимных пересечений кратеров с учетом морфологических классов секущего и пересекаемого кратеров и их размеров. В качестве исходных материалов использовались результаты дешифрирования крупномасштабных (~1:10 000) фотографий трех морских участков лунной поверхности, полученных космическими аппаратами серии «Лунар Орбитер». Один из этих участков расположен в Заливе Центральном, второй — в Океане Бурь примерно в 250 км к югу от кратера Коперник, третий — тоже в Океане Бурь в 250 км к юго-западу от кратера Кеплер. Исследованиями охвачена площадь около 2800 кв. км. Данные, полученные по каждому из трех исследованных участков, оказались однотипными и поэтому в дальнейшем описание результатов приводится для всей исследованной территории в целом. Анализировались взаимные пересечения и наложения всех кратеров диаметром от 60 м до 2,5 км.

Большая часть исследованных пересечений относится к случаям, когда диаметры пересекающихся кратеров лежат в пределах 60–600 м. При этом учитывались только случаи явных пересечений и наложений, когда определение того, какой из кратеров является секущим, а какой пересекаемым, сомнений не вызывало. Всего учтено 1209 случаев взаимных пересечений и наложений, распределение которых по морфологическим классам приведено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1.

Общее количество изученных пересечений кратеров

	Секущие кратеры					
		A	AB	B	BC	C
Пересекаемые кратеры	A	—	—	—	—	1
	AB	—	6	9	8	4
	B	22	47	109	59	49
	BC	18	53	152	64	39
	C	56	80	192	167	74

Было замечено, что пересечение свежих форм зрелыми наблюдается в тех случаях, когда секущий кратер по размеру меньше пересекаемого. Поэтому результаты подсчетов были сгруппированы в 8 выборок, отличающихся между собой по величине отношения диаметра секущего кратера D_2 к диаметру пересекаемого кратера D_1 . Результаты по каждой выборке приводятся в табл. 2. Обобщенные данные приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 2.

Количество пересечений кратеров в выборках с различной величиной отношения D_2/D_1 .

Буквы соответствуют обозначениям морфологических классов кратеров: с верхней стороны — секущих кратеров, с левой стороны — пересекаемых кратеров.

$D_2/D_1 < 0,1$						$D_2/D_1 = 0,1-0,3$					
	A	AB	B	BC	C		A	AB	B	BC	C
A	—	—	—	—	1	A	—	—	—	—	—
AB	—	—	—	2	2	AB	—	3	6	3	2
B	2	2	—	1	2	B	11	8	35	22	24
BC	—	1	—	—	—	BC	5	13	32	18	11
C	—	—	—	—	1	C	11	17	30	23	17
n = 14						n = 291					

$D_2/D_1 = 0,3-0,5$						$D_2/D_1 = 0,5-0,7$					
	A	AB	B	BC	C		A	AB	B	BC	C
A	—	—	—	—	—	A	—	—	—	—	—
AB	—	3	2	2	—	AB	—	—	1	—	—
B	2	16	38	23	18	B	4	13	18	12	8
BC	3	13	45	19	18	BC	5	13	28	14	6
C	18	25	55	56	38	C	8	19	44	42	13
n = 388						n = 248					

$D_2/D_1 = 0,7-0,9$						$D_2/D_1 = 0,9-1,1$					
	A	AB	B	BC	C		A	AB	B	BC	C
A	—	—	—	—	—	A	—	—	—	—	—
AB	—	—	—	1	—	AB	—	—	—	—	—
B	2	2	7	1	—	B	—	4	6	—	—
BC	4	7	22	7	2	BC	—	3	14	5	1
C	14	9	24	21	4	C	2	7	23	16	3
n = 127						n = 84					

$D_2/D_1 = 1,1-1,3$						$D_2/D_1 > 1,3$					
	A	AB	B	BC	C		A	AB	B	BC	C
A	-	-	-	-	-	A	-	-	-	-	-
AB	-	-	-	-	-	AB	-	-	-	-	-
B	-	1	3	-	-	B	1	1	2	-	-
BC	1	1	5	1	-	BC	-	2	6	1	-
C	2	2	7	5	-	C	1	1	9	4	1
n = 28						n = 29					

ТАБЛИЦА 3.

Относительные количества (%) различных типов пересечений кратеров

Характер пересечений	Отношение диаметра секущего кратера к диаметру пересекаемого кратера (D_1/D_2)							
	< 0,1	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,7-0,9	0,9-1,1	1,1-1,3	> 1,3
Свежие кратеры секут зрелые								
Разница 1 класса	14,2	21,6	30,3	33,5	35,5	40,5	39,2	38,1
Разница 2 класса	21,2	17,9	18,2	24,7	26,0	30,9	28,6	41,4
Разница 3 класса	—	7,5	7,1	9,7	10,2	8,3	10,7	3,4
Разница 4 класса	—	3,8	4,6	3,2	11,0	2,4	7,1	3,4
Итого:	35,4	51,5	60,2	71,1	82,7	82,1	85,6	86,3
Зрелые кратеры секут свежие								
Разница 1 класса	7,0	13,4	11,0	7,6	2,4	1,2	—	—
Разница 2 класса	28,4	9,3	4,4	3,2	0,8	—	—	—
Разница 3 класса	14,2	0,7	—	—	—	—	—	—
Разница 4 класса	7,0	—	—	—	—	—	—	—
Итого:	57,6	23,4	15,4	10,8	3,2	1,2	—	—

Пересечение кратеров одинаковых морфологических классов	7,0	25,1	24,4	18,1	14,1	16,7	14,4	13,7
Всего:	100	100	100	100	100	100	100	100
Общее количество пересечений	14	291	388	248	127	84	28	29

Из результатов, представленных в табл. 3, видно, что пересечение зрелых кратеров свежими наблюдается при всех изученных значениях D_2/D_1 . Относительное количество пересечений такого типа возрастает с увеличением отношения D_2/D_1 . Наиболее часто встречаются случаи, когда разница в степени морфологической выраженности кратеров составляет 1 класс (например, кратер класса АВ сечет кратер класса В). С увеличением этой разницы до 2-х, 3-х и затем 4-х классов, частота встречаемости, как правило, резко падает.

Пересечение свежих кратеров зрелыми широко распространено в тех случаях, когда диаметр секущего кратера намного меньше диаметра пересекаемого кратера (D_2/D_1 от $< 0,1$ до $0,1-0,3$). По мере сближения размеров секущего и пересекаемого кратеров частота встречаемости пересечений такого типа уменьшается. В выборке $D_2/D_1 = 0,9-1,1$ известен только один случай пересечений такого типа — кратер класса С диаметром 90 м сечет кратер класса ВС диаметром 100 м. В выборках $D_2/D_1 = 1,1-1,3$ и $D_2/D_1 > 1,3$ такие случаи не известны. Весьма характерно, что при пересечениях такого типа случаи, когда разница в морфологической зрелости пересекающихся кратеров достигает 3–4 классов, наблюдаются только в выборках $D_2/D_1 > 0,1$ и $D_2/D_1 = 0,1-0,3$. С увеличением отношения D_2/D_1 эта разница уменьшается до 2-х, а затем до 1 класса.

Пересечения кратеров, относящихся к одному морфологическому классу, встречаются во всем изученном интервале значений D_2/D_1 . Судя по данным для наиболее представительных выборок, частота встречаемости пересечений этого типа постепенно уменьшается с ростом отношения D_2/D_1 .

Из анализа выявленных закономерностей следует, что для кратеров равных размеров степень морфологической зрелости кратера действительно является функцией времени его существования. Кратеры класса А являются наиболее молодыми, а кратеры класса С — наиболее зрелыми. Морфологическое развитие кратеров действительно отвечает эволюции форм кратера со временем и происходит по схеме:

$$A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C$$

Пересечение зрелыми кратерами свежих форм наблюдается только тогда, когда секущий кратер меньше пересекаемого. При установленном порядке эволюции кратеров это может быть только в том случае, если скорость эволюции малого секущего кратера выше, чем скорость эволюции большого пересекаемого кратера. При прочих равных условиях это означает, что скорость эволюции кратера является функцией его размеров. Чем крупнее кратер, тем медленнее он эволюционирует и тем больше время его существования.

Следует отметить, что секущий кратер, как правило, располагается в пределах вала пересекаемого кратера и эволюционирует он на участке, в котором могут быть несколько иные свойства реголита и первоначальный уклон поверхности. Поэтому на выявленные закономерности может оказывать влияние эффект неадекватности условий, который сейчас строго учесть невозможно. Однако в тех случаях, когда пересекаемые кратеры представлены формами класса ВС и С этот эффект должен быть очень малым, так как кратеры этих классов в подавляющем большинстве случаев не имеют вала, а свойства реголита в непосредственной близости от них, по-видимому, близки к свойствам реголита межкратерного пространства. Данные для пересечений такого рода сведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, для тех случаев, когда пересекаемые кратеры представлены классами ВС и С, сохраняются принципиально те же самые закономерности, которые были выявлены при анализе табл. 3. Отсюда следует, что зависимость скорости эволюции кратеров от их размера действительно имеет место.

Количественная оценка связи скорости эволюции кратеров с величиной их диаметра представляет особый интерес. Строгую оценку этой связи из-за недостаточности исходных данных в настоящее время получить невозможно. Однако данные, на основании которых составлена табл. 2, в скрытом виде содержат информацию по этому вопросу и, если принять некоторые допущения, то ориентировочную оценку этой связи все же можно получить. Основой для такой оценки являются следующие посылки. Если в узком интервале значений D_1/D_2 наблюдаются случаи пересечения кратеров определенного морфологического класса кратерами различных морфологических классов, то самая морфологически зрелая и, следовательно, самая древняя из секущих форм по возрасту ближе всего к пересекаемой форме. Пары таких близких по возрасту кратеров приведены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 4.

Относительные количества (%) различных типов пересечений кратеров.

Пересекаемые кратеры относятся к классам ВС и С.

Характер пересечений	D_1/D_2							
	< 0,1	0,1–0,3	0,3–0,5	0,5–0,7	0,7–0,9	0,9–1,1	1,1–1,3	> 1,3
Свежие кратеры секут зрелые	50,0	74,0	75,0	72,9	88,6	87,8	96,8	92,0
Зрелые кратеры секут свежие	—	6,2	6,3	3,1	1,8	1,4	—	—
Пересечение кратеров оди- наковых мор- фологических классов	50,0	19,8	18,7	14,0	9,6	10,8	4,2	8,0
Итого:	100	100	100	100	100	100	100	100
Количество пересечений	2	177	287	192	114	74	24	25

ТАБЛИЦА 5.

Близкие по возрасту пары секущих и пересекаемых кратеров.

№ п.п.	Классы и диаметры кратеров (м)		№ п.п.	Классы и диаметры кратеров (м)	
	секущий	пересекаемый		секущий	пересекаемый
1.	C-78	A-2500	18.	C-80	B-210
2.	C-248	AB-1500	19.	C-250	B-550
3.	C-60	AB-306	20.	B-190	AB-380
4.	BC-350	AB-780	21.	C-82	B-152
5.	BC-130	AB-310	22.	C-210	B-316
6.	C-146	B-319	23.	C-140	B-220
7.	C-77	B-243	24.	C-140	B-240
8.	C-69	B-179	25.	C-150	B-250
9.	C-108	B-228	26.	C-140	B-230
10.	C-132	B-420	27.	C-120	B-180
11.	C-164	B-398	28.	C-120	B-200
12.	C-105	B-234	29.	BC-792	AB-936
13.	C-99	B-295	30.	BC-180	B-250
14.	C-90	B-280	31.	C-170	BC-140
15.	C-90	B-270	32.	C-100	BC-140
16.	C-140	B-420	33.	C-90	BC-100
17.	C-120	B-290			

Кроме данных, приведенных в табл. 5, для получения искомой зависимости необходимо также знать относительное время пребывания кратеров в форме, соответствующей классам А, АВ, В, ВС и С (как минимум хотя бы для кратеров какого-либо одного размера). Эту информацию можно получить из оценки относительной распространенности кратеров, если допускать неизменность скорости кратерообразования в послеморской период и возможность достижения некоторого равновесия в популяции мелких лунных кратеров [2, 3]. Как показывают наши подсчеты, при указанных допущениях продолжительности промежутков времени пребывания кратеров в форме А, АВ, В, ВС и С, относятся между собой примерно как 1:5:35:60:100.

На основании приведенных выше данных была получена ориентировочная оценка связи скорости эволюции кратеров от величины их диаметра в интервале диаметров 60–600 м.

На рисунке по оси абсцисс показана величина диаметра кратера. По оси ординат — время в условных единицах, которые в принципе при получении новых данных могут быть переведены в реальные единицы, например, годы. Поля А, АВ, В, ВС и С на рис. 1 соответствуют времени пребывания кратера в форме того или иного класса. Время существования кратера диаметром 600 м принято равным 10 условным единицам. Полученная схема представляет некоторый компромисс между данными для индивидуальных кратеров (табл. 5) и, как любая схема, представляет явление в сильно идеализированном виде. По мере получения новой информации эта схема должна уточняться и модифицироваться.

В представленном варианте схемы обращает на себя внимание, что кривые, отражающие зависимость времени существования кратера и времени пребывания его в форме различных морфологических классов от величины диаметра состоят из двух ветвей, в пределах каждой из ветвей зависимость близка к линейной. Перегиб кривых находится в области диаметров 100–200 м. Левая ветвь (мелкие кратеры) более пологая, правая (крупные кратеры) более крутая. Причина этого явления, по-видимому, заключается в том, что кратеры, соответствующие левой ветви кривой, практически не выходят из пределов рыхлого обломочного слоя (реголита), а кратеры, соответствующие правой ветви кривой, вскрывают скальное основание.

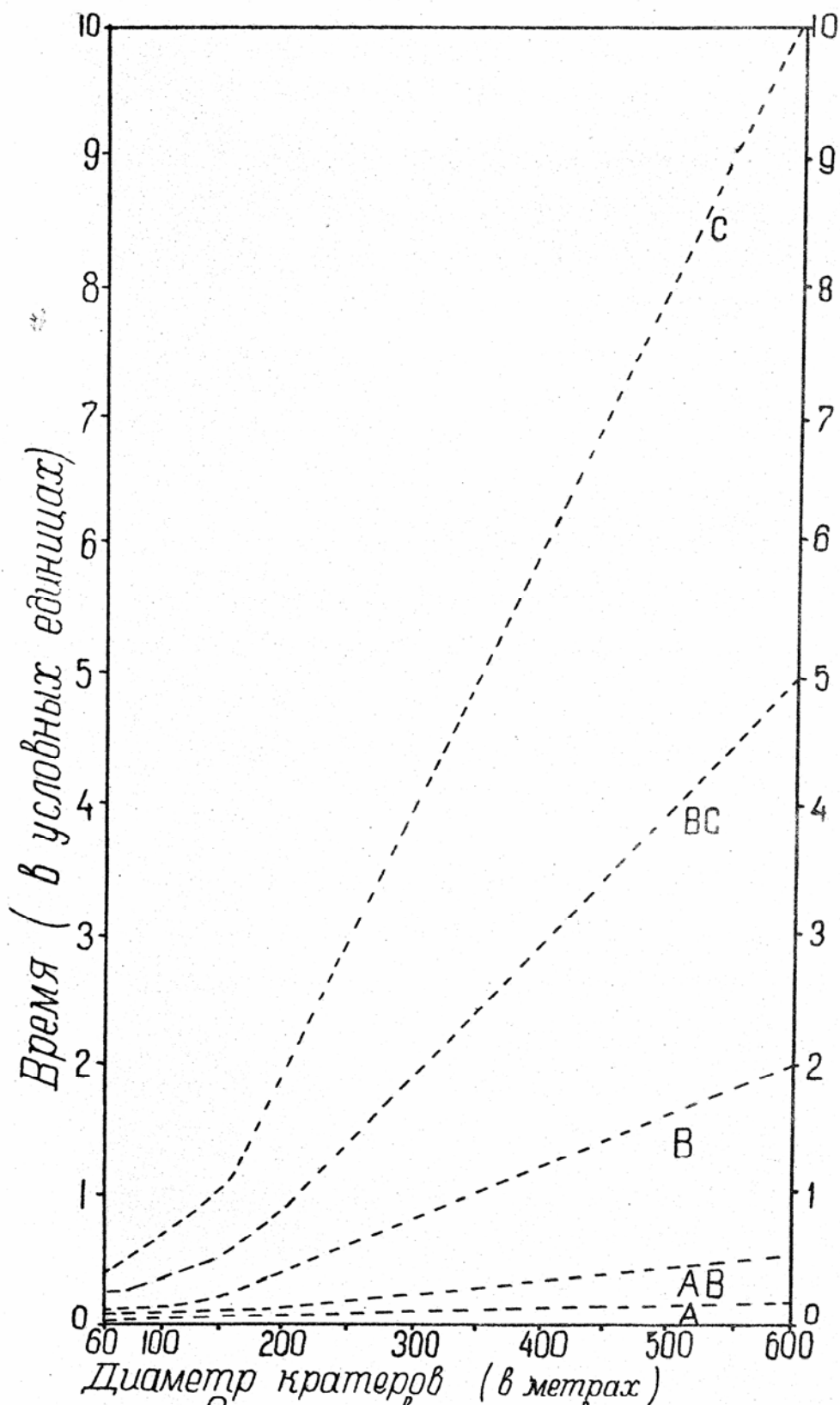
ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили получить аргументы в пользу того, что степень морфологической зрелости кратера является функцией времени его существования и размеров. Эта закономерность является статистической и не исключает возможности отдельных отклонений от нее, которых можно ожидать для кратеров, имеющих специфический генезис (например, для просадочных кратеров). В большинстве же случаев, среди кратеров равного диаметра наиболее резко выраженные формы (класс А) являются наиболее молодыми, а сильно сглаженные формы (класс С) — самыми древними. Установлено также, что с увеличением диаметра кратера скорость его морфологической эволюции уменьшается. Чем крупнее кратер, тем медленнее он эволюционирует и тем больше время возможного существования его на лунной поверхности. Получена ориентировочная оценка зависимости относительной скорости эволюции кратеров от величины их диаметра в интервале диаметров 60–600 м.

Основой для настоящей работы послужило морфологическое дешифрирование снимков лунной поверхности, выполненное В.П.Полосухиным и О.Д.Родэ, которым авторы выражают свою признательность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флоренский К.П., Таборко И.М. Некоторые выводы по морфометрии участков Луны, снятых станцией «Луна-12». Симпозиум по физике Луны и планет, 16 октября 1968 г. Тезисы докладов. Киев, 1968.
2. Morris E.C., Shoemaker E.M. Craters, in «Surveyor Project final report, Part II, Science results». TR 32–1265, GPL, Pasadena, 1968.
3. Shoemaker E.M. et al. Lunar regolith at Tranquility Base, Science, 1970, vol. 167, No. 3918.



Ориентировочная зависимость относительного времени существования кратеров от величины диаметра.